

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE  
GEOPOLIMEROS OPTIMIZADOS

SERGIO ALEJANDRO DIAZ SUAREZ

Proyecto de grado en la modalidad de Proyecto de investigación para optar al  
Título de Ingeniero Civil

Director:

OSCAR GUTIERREZ JUNCO

I.C., Dr. En ingeniería y ciencia de los materiales

Codirector:

MARFA CAROLINA MOLANO

IC., Dra. En ingeniería y ciencia de los materiales

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
TUNJA  
2018

“La autoridad científica de la Facultad de Ingeniería reside en ella misma, por lo tanto, no responde por las opiniones expresadas en este trabajo de grado”

Se autoriza su reproducción indicando necesariamente su origen.

@2018.

Nota de aceptación.

-----  
Presidente del jurado

-----  
Firma del jurado

-----  
Firma del jurado

Colombia, Tunja. – marzo de 2018.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, a Dios por permitirme seguir las sendas del estudio de tan bella profesión.

A mis padres Alejandro Díaz y Claudia Rocío Suarez por su apoyo incondicional, su amor y su paciencia en cada una de las etapas de mi vida.

A Laura Catalina Camargo por brindarme su apoyo y comprensión en los tantos retos y obstáculos que se presentaron durante la carrera.

Al ingeniero Oscar Gutiérrez Junco y a la ingeniera Marfa Carolina Molano por su asesoría técnica, acompañamiento y colaboración desde la dirección y codirección del presente trabajo de grado.

A Gerardo Avella, a Leonardo Gaviria y a Sergio López, por su apoyo y colaboración incondicional, por cada una de las experiencias y las anécdotas compartidas, por las enseñanzas que aportaron en mi vida a nivel personal y profesional.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL: .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	18
2. JUSTIFICACIÓN Y PERTINENCIA .....	19
3. MARCO CONCEPTUAL .....	21
4. ESTADO DEL ARTE .....	24
5. GENERALIDADES .....	26
5.1 CENIZA VOLANTE .....	26
5.2 SOLUCIÓN ACTIVADORA .....	27
5.3 DISEÑO DE MEZCLA .....	27
5.4 HERRAMIENTAS Y MATERIALES .....	29
5.5 HORNO DE SECADO .....	30
6. EVALUACIÓN DE DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE MEZCLA PARA LA SÍNTESIS DE GEOPOLÍMEROS. ....	31
6.1 SOLUCIÓN ACTIVADORA .....	31
6.1.1 Mezcla de solución activadora proceso 1.....	32
6.1.2 Mezcla de solución activadora proceso 2.....	32
6.1.3 Mezcla de solución activadora proceso 3.....	33
6.1.4 Tiempos de mezcla de la solución.....	33
6.1.5 Tiempo de reposo de la solución activadora.....	33
6.1.6 Mezcla de la solución activadora con aditivos.....	34
6.2 PREPARACIÓN DE AGREGADO FINO.....	34
6.3 MEZCLA DE MATERIAL ALCALINIZANTE CON CENIZA VOLANTE...35	
6.3.1 Mezcla de la ceniza con solución alcalina proceso 1. ....	36
6.3.2 Mezcla de la ceniza con solución alcalina proceso 2. ....	36
6.3.3 Mezcla de la ceniza con solución alcalina proceso 3. ....	36
6.3.4 Fases del proceso de mezclado entre la ceniza volante y la solución alcalina.....	37
6.4 HOMOGENEIZACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE Y EL AGREGADO FINO.....	38
6.5 ENCAPSULADO DE LAS MEZCLAS.....	39

6.6 CURADO Y ALMACENAMIENTO.....	39
6.6.1 Curado número 1.....	40
6.6.2 Curado número 2.....	40
6.6.3 Curado número 3.....	40
7. FACTORES QUE PUEDEN INCIDIR EN LA RESISTENCIA DEL GEOPOLÍMERO EN LO REFERENTE AL PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN.....	43
7.1 INFLUENCIA DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALCALINA.....	43
7.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE CURADO UTILIZADO.....	44
8. PROCEDIMIENTO OPTIMIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE UN GEOPOLÍMERO.....	49
8.1 NORMAS BÁSICAS DE SEGURIDAD.....	49
8.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.....	49
8.3 PROCEDIMIENTO.....	50
9. OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS GEOPOLIMEROS ELABORADOS A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS DISPONIBLES EN LA REGIÓN.....	53
9.1 ADICIÓN DE FIBRAS DE CÁÑAMO INDUSTRIAL.....	53
9.1.1 Resultados.....	54
9.2 IMPLEMENTACIÓN DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO A LA CENIZA VOLANTE.....	57
10. APOORTE EN EL DESARROLLO DE UN ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN SOBRE GEOPOLIMEROS EL CUAL SE ESCRIBIRÁ DE MANERA CONJUNTA CON OTROS INTEGRANTES DEL GRUPO GICA PARA SER PUBLICADO EN UNA REVISTA ESPECIALIZADA.....	60
APORTES.....	61
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFIA.....	65

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de la historia de los geopolímeros .....	24
Tabla 2. Diseño de mezcla. ....	29
Tabla 3. Esfuerzo máximo mezcla A1.....	44
Tabla 4. Esfuerzo máximo mezcla B1.....	44
Tabla 5. Esfuerzo máximo método de curado #1.....	45
Tabla 6. Esfuerzo máximo método de curado #2.....	45
Tabla 7. Esfuerzo máximo método de curado #3.....	45
Tabla 8. Esfuerzo máximo mezcla 0% superplastificante .....	47
Tabla 9. Esfuerzo máximo mezcla 0,5% superplastificante .....	47
Tabla 10. Esfuerzo máximo mezcla 1% superplastificante .....	47
Tabla 11. Resistencia a compresión de mortero con mezcla patrón.....	55
Tabla 12. Resistencia a compresión de mortero con mezcla B. ....	55
Tabla 13. Resistencia a tensión de mortero con mezcla patrón.....	55
Tabla 14. Resistencia a tensión de mortero con mezcla B .....	55
Tabla 15. Resistencia a compresión de mezcla A (pastas). ....	56
Tabla 16. Resistencia a compresión de mezcla B (pastas). ....	56
Tabla 17. Resistencia a tensión de mezcla A (pastas). ....	56
Tabla 18. Resistencia a tensión de mezcla B (pastas). ....	56
Tabla 19. Resistencia a compresión de mezcla A2 (pastas) .....	59
Tabla 20. Resistencia a compresión de mezcla B2 (pastas) .....	59

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ceniza volante .....	26
Ilustración 2. Silicato de Sodio .....	28
Ilustración 3. Hidróxido de sodio .....	28
Ilustración 4. Herramientas .....	30
Ilustración 5. Cronometro.....	30
Ilustración 6. Medidor de pH .....	30
Ilustración 7. Horno de secado .....	30
Ilustración 8. Almacenamiento de solución.....	32
Ilustración 9. Mezcla de solución activadora incluyendo superplastificante .....	34
Ilustración 10. Mezcla de solución activadora sin superplastificante .....	34
Ilustración 11. Mezcla de solución mediante mesa vibratoria .....	34
Ilustración 12. Preparación del agregado fino.....	35
Ilustración 13. Agregado fino en estado SSS .....	35
Ilustración 14. Amasadora planetaria Hobart N50. ....	37
Ilustración 15. Procedimiento de mezcla .....	37
Ilustración 16. Mezcla en proceso con recubrimiento de papel vinipel. ....	38
Ilustración 17. Mezcla en proceso.....	38
Ilustración 18. Mezcla geopolimérica en su fase final.....	38
Ilustración 19. Vibrado de probetas .....	39
Ilustración 20. Enrazado de probetas. ....	39
Ilustración 21. Mezclas encapsuladas. ....	39
Ilustración 22. Disposición de probetas para curado .....	42
Ilustración 23. Curado de probetas en horno de secado a 60°C .....	42
Ilustración 24. Fibra de cáñamo industrial. ....	54
Ilustración 25. Mezcla de material precursor, arena y fibra de cáñamo industrial..	54
Ilustración 26. Ceniza volante sumergida en agua .....	58
Ilustración 27. Retiro del agua mediante tamiz de tela. ....	58
Ilustración 28. Material dispuesto en el horno.....	58



## LISTA DE GRÁFICOS

Grafico 1. Influencia del proceso de mezclado de la solución alcalina. ....	44
Grafico 2. Influencia del tipo de curado.....	46
Grafico 3. Influencia del uso de superplastificante en la resistencia .....	47
Grafico 4. Propiedades mecánicas de las mezclas de morteros.....	55
Grafico 5. Propiedades mecánicas de las mezclas de pastas .....	57
Grafico 6. Optimización mediante tratamiento térmico del material precursor.....	59

## LISTADO DE ANEXOS

1. Cronograma.
2. Caracterización de arenas.
3. Ficha técnica hidróxido de sodio.
4. Especificaciones técnicas silicato de sodio líquido.
5. Ficha técnica vortex ika 3.
6. Ficha técnica mesa vibratoria Humboldt.
7. Artículo-optimización de las propiedades mecánicas de geopolimeros elaborados con ceniza volante de la termoeléctrica “TermoPaipa”.
8. Diseño de mezcla.

## RESUMEN

El presente informe muestra los resultados de la investigación enfocada al desarrollo de un procedimiento para la elaboración de geopolímeros optimizados; pretendiendo brindar a partir de esta, una herramienta para futuras investigaciones en el campo de los cementos activados alcalinamente; la herramienta mediante la cual se logra el apartado anterior, consta de un procedimiento que permita elaborar geopolímeros a base de ceniza volante de la termoeléctrica “TermoPaipa” inferido a partir de una evaluación general del comportamiento de esta ceniza en particular y los componentes de dicho geopolímero luego de modificar factores como: las formas, tiempos y equipos de mezclado asimismo procedimientos de curado, entre otros.

Además, es pertinente la investigación con la lucha propuesta por todas las naciones ante la problemática del calentamiento global, producido por la contaminación del medio ambiente. En el país se hace necesario realizar investigaciones que brinden herramientas para conseguir estar a la vanguardia en los temas mencionados.

Para lograr el propósito de la investigación se optó por una metodología de laboratorio en la cual se realizó en primera instancia una valoración de los diferentes procedimientos, en las distintas etapas que se pueden seguir para la consecución de un geopolímero, recurriendo a investigaciones previas, a la literatura encontrada, a asesorías técnicas por parte de la codirectora y a las mezclas realizadas en laboratorio.

En función de los resultados cualitativos obtenidos de los diferentes procedimientos evaluados, los resultados experimentales y los resultados cuantitativos obtenidos de los ensayos realizados a las probetas elaboradas, fue posible determinar un procedimiento óptimo para la elaboración de geopolímeros basados en ceniza volante originaria de la termoeléctrica TermoPaipa, la cual tiene características poco favorables en los procesos de geopolimerización como lo son los altos contenidos de material orgánico no incinerado y tamaños de partículas muy grandes en relación a cenizas catalogadas como óptimas para la elaboración de geopolímeros.

Dentro de la investigación se realizaron mezclas con la adición de fibras de cáñamo industriales y con la implementación de un tratamiento térmico realizado a la ceniza

volante; con el fin de optimizar las propiedades mecánicas de los geopolímeros tanto a compresión como a tensión.

La investigación arrojó resultados que se sintetizaron en primer lugar en un procedimiento para la obtención de geopolímeros, el cual fue optimizado mediante modificaciones en tiempos, uso de superplastificante, uso de equipos y proceso de curado; además se infirieron como principales factores que afectan las propiedades mecánicas de los geopolímeros, el proceso de curado y el proceso usado para la elaboración de la solución alcalina. Finalmente se obtuvo una optimización de un 54% en cuanto a la resistencia a la compresión a partir de un tratamiento térmico realizado a la ceniza y de hasta un 28% a partir de la adición de fibras de cáñamo industrial; además, la resistencia a la tensión fue mejorada en un 71% con la adición de dicha fibra.

Mediante la investigación socializada se infirió que a la ceniza producida por la termoeléctrica “TermoPaipa” tiene un mejor comportamiento con la aplicación de tratamientos que permitan mejorar sus propiedades físicas, adicionalmente se determinó que el uso de fibra de cáñamo aporta de forma positiva en las propiedades mecánicas de los geopolímeros y finalmente es necesario aclarar que cada uno de los procedimientos evaluados y seleccionados en el presente informe tuvo incidencia en la factibilidad de la elaboración de los geopolímeros.

## ABSTRACT

This report shows the results of the research focused on the development of a procedure for the elaboration of optimized geopolymers; pretending to provide from this, a tool for future research in the field of alkaline activated cements; The tool by which the previous section is achieved consists of a procedure that allows geopolymers to be elaborated based on flying ash from the thermoelectric "TermoPaipa" inferred from a general evaluation of the behavior of this particular ash and the components of said geopolymer. to modify factors such as: forms, times and mixing equipment, as well as curing procedures, among others.

In addition, research is relevant to the struggle proposed by all nations in the face of the problem of global warming, caused by the pollution of the environment. In the country, it is necessary to carry out research that provides tools to be at the forefront of the aforementioned issues.

To achieve the purpose of the research, a laboratory methodology was chosen, in which an evaluation of the different procedures was carried out, in the different stages that can be followed to achieve a geopolymer, using previous research, the literature found, technical advice from the co-director and mixtures made in the laboratory.

Based on the qualitative results obtained from the different procedures evaluated, the experimental results and the quantitative results obtained from the tests carried out on the processed specimens, it was possible to determine an optimal procedure for the preparation of geopolymers based on fly ash originating from the thermoelectric TermoPaipa , which has unfavorable characteristics in geopolymerization processes such as the high contents of unburned organic material and very large particle sizes in relation to ashes cataloged as optimal for the preparation of geopolymers.

Within the research, mixtures were made with the addition of industrial hemp fibers and with the implementation of a thermal treatment carried out on the fly ash; in order to optimize the mechanical properties of geopolymers, both compression and tension.

The research produced results that were first synthesized in a procedure for obtaining geopolymers, which was optimized by modifications in times, use of superplasticizer, use of equipment and curing process; In addition, they were inferred as the main factors that affect the mechanical properties of geopolymers, the curing process and the process used to make the alkaline solution. Finally, an optimization of 54% was obtained in terms of the resistance to compression from a thermal treatment performed on the ash and up to 28% from the addition of industrial hemp fibers; In addition, the tensile strength was improved by 71% with the addition of said fiber.

Through socialized research it was inferred that the ash produced by the thermoelectric "TermoPaipa" has a better behavior with the application of treatments that improve their physical properties, additionally it was determined that the use of hemp fiber contributes positively in the properties Mechanics of the geopolymers and finally it is necessary to clarify that each of the procedures evaluated and selected in this report had an impact on the feasibility of the geopolimeros elaboration.

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial se ha dado la prioridad adecuada al cuidado del medio ambiente con legislaciones y medidas que aportan a la disminución de los diferentes tipos de contaminación generadas por la manufactura de materiales en todas las industrias que ayudan a suplir las necesidades del hombre.

En los países más desarrollados se han adelantado investigaciones para producir alternativas en las industrias que funcionen con mayor eficiencia y que sean más amigables con el medio ambiente por lo general desarrolladas en base a la reutilización de desechos. La industria de la construcción no es una excepción, por ejemplo en el caso del cemento que es uno de los materiales que se ha manufacturado por décadas para ser usado en el desarrollo de todo tipo de obra civil afecta de forma negativa el medio ambiente durante su fabricación por las emisiones de partículas sólidas y por la generación de gases como el monóxido y dióxido de carbono, entre otros que pueden provocar daños en la salud de las personas tales como problemas en las vías respiratorias o en los casos más graves generar cáncer por las dioxinas que quedan suspendidas en el medio ambiente.

Una alternativa planteada e investigada por muchas entidades y universidades en el mundo es el desarrollo de geopolímeros, puesto que este es un material producido a base de desechos generados por diferentes industrias como es el caso de la ceniza volante, es producida a partir de la combustión del carbón en las termoeléctricas para la generación de energía eléctrica; en el caso de Colombia se está comenzando a replicar la investigación de este tipo de materiales para poder avanzar en la generación de dichas alternativas pero con el uso de los equipos y materiales disponibles en el país.

La presente investigación tiene como fin dar a conocer procedimientos usados en el laboratorio para elaborar geopolímeros con materias primas de la región, equipos y herramientas disponibles en un laboratorio que no necesariamente debe ser de alta tecnología, además se mostraran los resultados obtenidos con la optimización de geopolímeros a partir del uso de fibras de cáñamo industrial, generando así un precedente que sirva como guía para nuevas investigaciones en el país relacionadas con dicho material y avances en cuanto a la optimización de los materiales usados en la construcción.

El presente proyecto de investigación está dirigido a ingenieros, físicos, químicos, expertos en materiales y estudiantes interesados en la búsqueda de materiales alternativos a los convencionales, a las compañías fabricantes de cemento y demás personas que estén interesadas en aportar con la disminución de la contaminación.



## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL:**

Desarrollar un proceso óptimo para la elaboración de un material geopolimérico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Evaluar diferentes procedimientos de mezcla para la síntesis de geopolímeros.
- Determinar los posibles factores que pueden incidir en la resistencia del geopolímero en lo referente al procedimiento de elaboración.
- Establecer un procedimiento optimizado para la obtención de un geopolímero.
- Realizar una optimización de las propiedades mecánicas de los geopolímeros elaborados a partir de materias primas disponibles en la región.
- Aportar de manera significativa en el desarrollo de un artículo de investigación sobre geopolímeros el cual se escribirá de manera conjunta con otros integrantes del grupo GICA para ser publicado en una revista especializada.

## 2. JUSTIFICACIÓN Y PERTINENCIA

En el desarrollo de las diferentes industrias alrededor del mundo se han realizado incursiones en la implementación de nuevos materiales que puedan suplir los que actualmente se usan, de tal forma que se obtengan beneficios para el medio ambiente y para la industria sin perder las propiedades de estos y que no tengan incidencia en su calidad; es por esta razón que en la industria de la construcción se están investigando los geopolímeros elaborados a partir de residuos de producciones industriales así como la industria del acero o la generación de energía eléctrica y de químicos que actúan como activadores alcalinos, con el fin de reemplazar o complementar en un futuro el cemento portland que es la principal materia prima usada en dicha industria, pero que es una de las principales fuentes de contaminación en el mundo, puesto que para su producción genera entre un 5% y un 8% de la carga total de CO<sub>2</sub> del mundo<sup>1</sup>.

Dentro de las investigaciones a nivel mundial de los geopolímeros se han obtenido resultados favorables en cuanto a propiedades mecánicas, físicas y de durabilidad, sin embargo, a causa de la heterogeneidad de las cenizas volantes suministradas en las diferentes partes del mundo. Por lo anterior, se hace necesario llevar a cabo una investigación con la que se obtengan procedimientos para la elaboración de geopolímeros que sean aplicables en el país, donde se demuestren los diferentes comportamientos de la ceniza propia de la región sintetizada en un geopolímero.

Además, existen en la industria de los cementos diversos materiales o aditamentos creados para optimizar de diferentes maneras las mezclas de cemento, en el caso del control de fisuración y la resistencia al agrietamiento se han agregado diferentes tipos de fibras a las mezclas, tales como las fibras de acero, plástico o vidrio y en otros casos de materiales naturales que se han ido estudiando a través del tiempo en diferentes países en función de la demanda de las plantas a partir de las cuales los extraen, en el caso de Colombia, el país se encuentra en un periodo de transición del posconflicto en el cual uno de los factores más determinantes en la financiación de los grupos al margen de la ley, en época de guerra, fueron los cultivos ilícitos en los cuales participaban algunos grupos poblacionales de las zonas siendo ésta una de las principales fuentes de ingresos para ellos y en el afán por generar un trabajo para estas personas se ha impulsado el estudio de la utilización de las plantas de cannabis con fines industriales como ya se ha hecho en algunos países como

---

<sup>1</sup> FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; TORRÉNS-MARTÍN, D. y MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. Carbonation of ternary building cementing materials. En: Cement Concrete Comp. ScienceDirect. Article in press. 2012. p. 6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.016>.

Canadá, Estados Unidos, Australia y algunos otros pertenecientes a la unión europea; dentro de la industria del cáñamo se encuentra entre otros su uso en confección de ropa, su uso para la producción de papel y muchos otros; por lo tanto es adecuado realizar investigaciones de su aplicación en la industria de la construcción haciendo uso de la fibra de cáñamo industrial para la optimización de los geopolímeros, dándole así mayor competitividad al país y a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en temas de geopolímeros y materiales innovadores que sean amigables con el medio ambiente para la industria de la construcción.

### 3. MARCO CONCEPTUAL

Dado que la idea principal del presente documento gira entorno a la utilización de geopolímeros a nivel mundial como alternativa al cemento portland es necesario aclarar el concepto de geopolímero, el termino polímero es usado para referenciar una molécula en la cual su estructura está compuesta por unidades repetidas llamadas monómeros. En 1979, Joseph Davidovits introdujo el término geopolímero para denotar aquellos polímeros de origen inorgánico obtenidos tras la síntesis de una solución alcalina con un sólido constituido fundamentalmente por aluminosilicatos; surge así el concepto de la geopolimerización<sup>2</sup>, aun así la trayectoria que ha seguido el estudio de los materiales activados alcalinamente se remontan desde hace más de un siglo como alternativa del Cemento Portland, teniendo buenos resultados al ser aplicado en países como Bélgica, Finlandia, la antigua Unión Soviética, China y recientemente en Australia<sup>3</sup>.

Los cementos activados alcalinamente están compuestos por una fuente de aluminosilicatos o de calcio, activadores alcalinos y agua, en las investigaciones previas se han utilizado residuos industriales como escoria granulada de alto horno, escoria granulada de fosforo, escoria de acero, escorias no ferrosas<sup>4</sup>. Cada una de estas obtenidas de residuos de procesos industriales.

La ceniza volante es un subproducto de las centrales térmicas, que está siendo producido por la combustión de carbón pulverizado en el horno. Según el contenido de CaO, las cenizas volantes se clasifican en dos tipos. Estos son Clase C (alto contenido de CaO) y tipo Clase F (Bajo Contenido de CaO) de cenizas volantes<sup>5</sup>. Además de lo anterior, su calidad depende también de las diferencias que presentan las diversas cenizas producidas en diferentes partes del mundo, en cuanto al contenido de material orgánico, el cual corresponde al porcentaje de carbón que no fue incinerado, y a la cantidad y tamaño de las partículas vítreas o amorfas de los aluminosilicatos presentes en la ceniza.

---

<sup>2</sup> K. KOMNITSAS Y ZAHARAKI D. (2007). “Geopolimerization: A Review and Prospects for the Minerals Industry”. *Minerals Engineering*. 20, 1261-1277.

<sup>3</sup> PROVIS, John L.; State of the Art Report, RILEM TC 224 – AAM, Alkali – Activated Materials.

<sup>4</sup> SHI, C.; KRIVENCO, P. Y DELLA, R. *alkali-activated cements and concretes*. Taylor & francis. New york 2006

<sup>5</sup> SAHA, S. Y RAJASEKARAN, C.: “Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag” *Construction and Building Materials* 146 (2017) 615–620

Los activadores tienen la función de acelerar la solubilización de la fuente de aluminosilicatos, favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta con estos hidratos. Los activantes pueden ser compuestos alcalinos o alcalinotérreos, tales como hidróxidos ( $\text{ROH}$ ,  $\text{R(OH)}_2$ ), sales de ácido débil ( $\text{R}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{R}_2\text{S}$ ,  $\text{RF}$ ), sales de ácido fuerte ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y sales silícicas del tipo  $\text{R}_2\text{O}(\text{n})\text{SiO}_2$  donde R es un ion alcalino del tipo Na, K o Li. Al respecto, los activadores comúnmente usados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos<sup>6</sup>.

El proceso de geopolimerización como se mencionó anteriormente es el proceso con el que se forman cadenas compuestas por unidades más simples (monómeros) como cualquier otro polímero, la matriz geopolimérica (polímero inorgánico) tiene la ventaja de utilizar subproductos industriales como materia prima, puesto que se basan en materiales precursores de aluminosilicatos como la ceniza volante y forman redes poliméricas Si-O-Al, además, como lo menciona Laureano Cornejo Álvarez en su artículo: Materiales cementantes de activación alcalina (MAA): Geopolimeros, en el caso de estos polímeros, la geopolimerización se puede dividir en 3 etapas diferentes, la etapa de disolución de los aluminosilicatos en una solución alcalina fuerte con  $\text{pH} > 12$ , siendo esta según el autor la más importante, puesto que en ella se disuelven las partículas vítreas o amorfas de los aluminosilicatos y se rompen Si-O-Si y Al-O-Si; en la segunda etapa se lleva a cabo la reorientación de los grupos de los iones formados, con los iones formados en la primera etapa se introducen en las cadenas de siloxonato; y finalmente sucede la etapa de policondensación en la cual se intensifica el proceso de síntesis, el sistema continua reordenándose y reorganizándose para aumentar la conectividad de la estructura del geopolímero.

La tecnología verde se basa en el uso de materiales, procesos o métodos que reducen o eliminan la creación de contaminantes o desechos desde las fuentes que los originan, incluyendo métodos reductores del uso de energía, agua y otros recursos, así como métodos que protegen los recursos naturales, ya sea mediante su prevención, o utilizándolos de manera más eficaz, para así lograr una reducción cuantificable de la contaminación emitida al medio ambiente<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> RODRÍGUEZ M. y ERICH D. (2009) “Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante”. Universidad Politécnica de Valencia.

<sup>7</sup> HARRY, Freeman. Manual de prevención de la contaminación industrial. Editorial McGRAW-HILL, ISBN 970-10-1889-3, 1998, 400-460.

En el marco legal de diferentes países, incluido Colombia, se encuentra excluido en su totalidad el uso de plantas como el cannabis, por la problemática social que se ve reflejada por su uso recreativo, sin embargo, existen muchas aplicaciones más que pueden generar beneficios para el país en diferentes industrias incluyendo la de la construcción.

El cáñamo industrial es un *commodity* agrícola particular. Es una variedad del cannabis Sativa que no tiene propiedades narcóticas, pues contiene solo 0,3% de tetrahidrocannabinol (componente psicoactivo); esto frente a su pariente la marihuana catalogada como una droga, que en promedio llega a tener concentraciones superiores al 20% de THC. Así pues, debido a la vasta variedad de mercados que promueve el cultivo de esta hierba, las leyes de algunos estados de este país norteamericano han empezado a ceder para legalizar su plantación. Sin embargo, en la mayor parte del planeta la plantación de cáñamo se encuentra en un limbo de ilegalidad por su cercanía con la marihuana psicoactiva; esto ha restringido el desarrollo y la consolidación de una agroindustria que podría tener un éxito económico a escala mundial. En efecto, estas barreras legales son un telón que esconden un montón de beneficios y oportunidades de negocio que puede presentar la legalización de este *commodity*.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> GARCES, Andrés. Cáñamo: oportunidades de negocios que rompen con paradigmas del pasado. UNIANDES agronegocios e industria de alimentos [en línea], 7 de septiembre de 2016 [revisado 12 Enero 2018] Disponible en internet: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/09/07/canamo-oportunidades-de-negocios-que-rompen-con-paradigmas-del-pasado/>

## 4. ESTADO DEL ARTE

A nivel mundial desde el comienzo de los estudios acerca de los cementos activados alcalinamente se han generado diferentes avances y reportes independientes a nivel mundial. En la siguiente tabla se observan los hechos más importantes relacionados con los geopolímeros desde 1950<sup>9</sup>:

Tabla 1. Resumen de la historia de los geopolímeros

Autor	Año	Episodio	Significado
Glukhovsky y Krivenko	1950s	Primeras escorias alcalinamente activadas mediante productos CSH y aluminosilicatos hidratados que se usan en construcción	Los aluminosilicatos hidratados son descubiertos y utilizados
Davidovits	1972	Cambio del lenguaje técnico para la transferencia de información científica básica	El término "geopolímero" es acuñado
Davidovits y Orlinsky	1988	Actas de la primera conferencia europea sobre los geopolímeros en mineralogía	Resumen de los trabajos de geopolímeros de los años 80 Primer registro de geopolímeros a partir de la activación alcalina de cenizas volantes
Wastiels et al.	1993	Geopolímero basados en cenizas volantes	Trabajos preliminares de geopolímeros basados en meta caolín
Rahier et al.	1996-1997	Aluminosilicatos sintetizados a bajas temperaturas	
Xu and van Deventer	2000, 2002	Geopolimerización de múltiples minerales	Geopolimerización de nuevos residuos aluminosilicatos Amplio número de informes y revisiones sobre los geopolímeros
Duxson et al.	2007	Publicación del informe "Tecnología de los geopolímeros: the estado actual del arte"	
Davidovits	2008	Publicación: " Química de los geopolímeros y aplicaciones" 2ª Edición	
Provis y van Deventer	2009	Publicación: " Geopolímeros: estructura, procesos, propiedades y aplicaciones industriales"	

Fuente. *Geopolymerization and Its Potential Application in Mine Tailings Consolidation: A Review*

Producto de la necesidad mundial de reducir los costos ambientales que tienen la producción de diversas materias primas se ha incentivado la investigación para obtener geopolímeros a partir de diferentes bases ricas en aluminosilicatos (escorias, cenizas volantes, cenizas volcánicas, residuos de minería, caolín, metacaolín, entre otras), activadas alcalinamente con diferentes sustancias,

<sup>9</sup> *Geopolymerization and Its Potential Application in Mine Tailings Consolidation: A Review* citado por: VILLAMOR L., Álvaro. "Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz"

investigaciones que han dado el soporte para proceder a desarrollar nuevos hallazgos como alternativas para el cemento portland. La mayoría de los estudios han encontrado que la combinación de dos activadores, hidróxido de sodio y silicato de sodio, proporcionan las mejores resistencias en geopolímeros de ceniza volante<sup>10</sup>.

Por una parte, el hidróxido de sodio causa mayor disolución de las especies reactivas de silicato y aluminato, comparado con otros activadores. Además, este activador es económico y se encuentra ampliamente disponible en el mercado. Por otra parte, el silicato de sodio proporciona sílice soluble para asistir el proceso de geopolimerización, especialmente en materias primas como la ceniza volante, en la cual el contenido de sílice reactiva esta menos disponible, en comparación con el metacaolín<sup>11</sup>.

Rattanasak et al., obtuvo una resistencia de 70 MPa en un geopolímero de ceniza volante elaborado con una relación (SS/HS) de 1.0. Otra investigación reportó que la máxima resistencia se obtuvo al emplear una relación de (SS/HS) de 2,5; así como Mejía J. M. et al, hallaron resultados favorables para mezclas de geopolímeros a base de cenizas volantes de baja calidad con 14% de material orgánico obteniendo hasta 14 Mpa caso contrario al reportado por Andini en 2007 en el que con una ceniza con 11% de material orgánico obtuvo mezclas con resistencia de hasta 4 Mpa.

Algunas investigaciones en las cuales se han agregado fibras de origen natural como la que fue llevada a cabo en la investigación adelantada por Osorio, et al<sup>12</sup>, demuestran que el uso de fibras de origen orgánico en un porcentaje adecuado incide en un mejoramiento de las propiedades mecánicas de elementos cementantes. En vista de lo anterior además de las investigaciones reflejadas en el artículo de la autoría de Libo, et al<sup>13</sup>, los materiales cementantes, tanto concretos como geopolímeros, al ser reforzados con fibra natural están ganando terreno como los eco-compuestos del futuro.

---

<sup>10</sup> CHEN-TAN, N. W. (2010). Geopolymer from a Western Australian fly ash. PhD thesis Curtin University

<sup>11</sup> DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., PALOMO, A., & VAN DEVENTER, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.

<sup>12</sup> OSORIO J.A.; ARISTIZABAL F. V. y HERRERA J. A. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *DYNA*. 2007, vol. 74, N° 153

<sup>13</sup> LIBO, Yan; BOHUMIL, Kasal y LIAN, Huang: "A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering" Elsevier; Composites Part B 92 (2016). <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>



## 5. GENERALIDADES

### 5.1 CENIZA VOLANTE

La ceniza volante usada como material precursor de aluminosilicatos en el proyecto de investigación fue adquirida en la termoeléctrica de Boyacá “TermoPaipa” propiedad de la empresa Gensa.

Según la clasificación de la ASTM C618-12 tiene una categorización más específica, que identifica este tipo de cenizas como clase C y clase F las cuales se diferencian en función de la cantidad de óxido de calcio presente en la misma, la clase C tiene un contenido rico en CaO mientras que la clase F carece de este o contiene porcentajes muy bajos con relación a la clase C; la clasificación correspondiente a la ceniza usada en la investigación es clase F. El tamaño medio de partícula es de 68  $\mu\text{m}$  y con un 88% de partículas con tamaño inferior a 140,8  $\mu\text{m}$  además se tiene aproximadamente un 15% de pérdidas por ignición (corresponde a material orgánico presente en la ceniza que no alcanzo a ser incinerado durante el proceso industrial).

*Ilustración 1. Ceniza volante*



*Fuente. El autor*

## 5.2 SOLUCIÓN ACTIVADORA

La solución que se optó usar para la investigación fue una solución alcalina compuesta por hidróxido de sodio, silicato soluble de sodio y agua puesto que como mencionan en sus investigaciones Hardjito<sup>14</sup> y Chen-Tan<sup>15</sup> en 2005 y 2010 respectivamente, los mejores resultados reportados para geopolimeros a base de cenizas clase F han sido con los componentes mencionados, además de ser químicos de fácil acceso; se optó por el uso de hidróxido de sodio en hojuelas y un silicato de sodio soluble con las especificaciones que se pueden observar en las fichas técnicas respectivas que se encuentran en los anexos 3 y 4.

## 5.3 DISEÑO DE MEZCLA.

El diseño de mezcla utilizado para los geopolimeros elaborados fue un diseño de mezcla sencillo, basado en datos de entrada tales como la densidad esperada u obtenida por ensayos previos del geopolímero en la cual se usó un valor de 1850 kg/m<sup>3</sup> en todas las mezclas, el porcentaje de agregados en caso de ser mortero o concreto, la relación solución alcalina/ceniza volante que fue de 0.35 para todos los casos del trabajo investigativo, la relación silicato de sodio/hidróxido de sodio en la cual se trabajó con un valor de 2.5, la molaridad del hidróxido de sodio por las características de la ceniza volante y teniendo en cuenta que los rangos reportados en la literatura oscilan entre concentraciones de 8 Molar y 16 Molar de (NaOH)<sup>16</sup> se decidió usar una molaridad de 12.

Varios investigadores recomiendan utilizar una concentración de NaOH mayor a 10 Molar<sup>17</sup>, con el fin de proporcionar un ambiente suficientemente alcalino que promueva la polimerización. Aunque se debe tener en cuenta que concentraciones muy altas de NaOH generan mezclas excesivamente cáusticas y corrosivas con

---

<sup>14</sup> HARDJITO, D., & RANGAN, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. PhD thesis Curtin University of Technology, Australia.

<sup>15</sup> CHEN-TAN, N. W. (2010). *Geopolymer from a Western Australian fly ash. PhD thesis Curtin University*

<sup>16</sup> AL BAKRI, A. M. M., KAMARUDIN, H., BNHUSSAIN, M., NIZAR, I. K., RAFIZA, A. R., & ZARINA, Y. (2012). *The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete. Rev. Adv. Mater. Sci*, 30, 90–97.

<sup>17</sup> PUERTAS, F., MARTÍN EZ-RAMÍREZ, S., ALONSO, S., & VÁZQUEZ, T. (2000). *Alkali-activated fly ash/slag cements. Cement and Concrete Research*, 30(10), 1625–1632. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2)

problemas adicionales de eflorescencia<sup>18</sup>, y por último la relación molar  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  del silicato de sodio, se trabajó con un valor de 2.1 puesto que este hace referencia a una característica propia del silicato soluble; dicho diseño de mezcla fue obtenido gracias al aporte de la investigación que está realizando la codirectora del presente trabajo de grado, en sus estudios de doctorado.

*Ilustración 2. Silicato de Sodio*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 3. Hidróxido de sodio*



*Fuente. El autor*

Finalmente, las cantidades que arroja el diseño de mezcla, luego de insertar los datos de entrada mencionado anteriormente, incluyen la cantidad en gramos de ceniza volante, masa de agregados, si es el caso, solución silicato de sodio, hidróxido de sodio y agua total requerida en la solución activadora como se muestra en la tabla 2.

---

<sup>18</sup> DAVIDOVITS, J. (2005). Geopolymer, *Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer 2005. Chemical Indicator of Geopolymer.*

Tabla 2. Diseño de mezcla.

PARAMETROS MEZCLA		
Relacion solucion alcalina/ceniza volante	0,35	
Relacion solucion silicato de sodio/solucion	2,5	
Molaridad solucion de hidroxido de sodio	12,0	
Relacion agua/solido	0,350	
CANTIDADES FINALES DE LA MEZCLA		
Ceniza volante	1192,70	g
Solucion silicato de sodio	298,18	g
Ojuela NaOH	57,25	g
cantidad total de agua	314,56	g
Total mezcla	1868,65	g

Fuente. Anexo 8: Diseño de mezcla.

En el caso en que se deseen adicionar materiales tales como fibras o aditivos estos se dan en porcentaje del peso total de la fracción solida de la mezcla, en el caso de pastas, es el porcentaje correspondiente del peso de ceniza volante, mientras que para un mortero o un concreto se daría en porcentaje del peso total de la suma de ceniza volante con agregados finos y gruesos según corresponda.

## 5.4 HERRAMIENTAS Y MATERIALES

Las herramientas utilizadas para proceder con las mezclas de geopolimeros fueron herramientas básicas tales como cucharas de diferentes tamaños para transporte de los materiales, varillas metálicas o plásticas, redondeadas con similitud a las usadas en el concreto de cemento portland para el proceso de elaboración de especímenes pero con dimensiones más pequeñas; espátulas para acomodar de mejor manera la mezcla en algunos procesos, bisturís de tipo quirúrgico, cronometro para controlar los tiempos de mezclas, medidor de pH para los componentes de la solución alcalina, papel vinipel para algunos procesos de mezcla y de almacenamiento, plaquetas de vidrio para enrasar los especímenes y moldes plásticos para el encapsulado de las mezclas. Se procuró ceñirse a las especificaciones correspondientes al muestreo de probetas de concreto en cuanto al material, ya que se seleccionó un material no absorbente y que con una superficie interna lisa.

*Ilustración 4. Herramientas*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 5. Cronometro*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 6. Medidor de pH*



*Fuente. El autor.*

## **5.5 HORNO DE SECADO**

El horno utilizado en la investigación es un horno de secado marca Eurolab con un rango de temperaturas de 50°C – 300°C con resolución de Temperatura de 0.1 °C y fluctuación de 1°C.

*Ilustración 7. Horno de secado*



*Fuente. El autor.*

## **6. EVALUACIÓN DE DIFERENTES PROCEDIMIENTOS DE MEZCLA PARA LA SÍNTESIS DE GEOPOLÍMEROS.**

Para llevar a cabo la síntesis de geopolímeros propuesta para el presente proyecto de investigación se tuvo que realizar una fase preliminar, la cual consto en primera instancia de una recopilación de información para establecer lo realizado en diferentes estudios referenciados a lo largo del documento, obteniendo información relacionada con las diferentes fuentes de aluminosilicatos que han usado para la elaboración de geopolímeros y sus respectivas propiedades o características, de qué forma y con qué componentes se mezclaron las soluciones activadoras usadas en los diferentes estudios y su efectividad, los tipos de curado que han funcionado en otras investigaciones, el almacenamiento y tratamiento de los diferentes componentes y mezclas que se han tenido en cuenta, la comprensión del principio que seguía el diseño de mezcla que se trabajó en la investigación y fue referenciado en el apartado 5,2; entre otros. Además de la recopilación de información se hizo la logística necesaria para obtener los equipos y herramientas usados para poder mezclar, al igual que la planeación de las fases y mezclas que se llevarían a cabo para lograr la síntesis de los geopolímeros, en una segunda fase fue posible iniciar con las primeras pruebas y mezclas piloto, valga aclarar que la logística y planeación del proyecto estuvo en constante cambio debido a la situaciones que surgían y a las diferencias que presentaba la fabricación de los geopolímeros a partir de las materias primas, herramientas y equipos disponibles para la región.

### **6.1 SOLUCIÓN ACTIVADORA**

En cuanto a la solución alcalina como se mencionó en las generalidades se seleccionó la mezcla en base a la teoría y a la accesibilidad de sus componentes en el mercado disponible en el país, el silicato soluble de sodio fue adquirido en la empresa “Manufacturas Silíceas S.A.S” con sede en la ciudad de Bogotá por otro lado el hidróxido de sodio fue adquirido en la empresa “Químicos Industriales Asociados S.A.S” con su sede principal en Bogotá.

En primer lugar se evaluó el almacenamiento y tratamiento de los químicos usados, puesto que el nivel de causticidad del hidróxido de sodio puede ser peligroso si no se manipula con las medidas de seguridad adecuadas como bien se establece en su ficha técnica adjuntada en el anexo 3 además que la mezcla por sus características propias es deliquescente, muy sensible al aire puede absorber la humedad del aire y disolverse en él, lo que podría generar perdidas de material por lo tanto el almacenamiento debe ser lo más hermético posible. En el caso de la presente investigación se usaron recipientes de plástico con cierre hermético y en

algunos casos se reforzó con papel vinipel para mayor hermetismo como se aprecia en la ilustración 8.

*Ilustración 8. Almacenamiento de solución.*



*Fuente. El autor.*

La mezcla de la solución se realizó mediante vibración y se usaron de 2 equipos diferentes disponibles en la universidad: un vibrador vortex3 marca ika y una mesa vibratoria marca Humboldt, utilizada principalmente para ensayos relacionados con el laboratorio de pavimentos. Las primeras pruebas se realizaron con el fin de determinar el orden de adición de los componentes de la solución haciendo uso de 3 formas distintas.

#### **6.1.1 Mezcla de solución activadora proceso 1.**

Se trataron de adicionar en un recipiente, luego de tener los componentes de la solución pesados, en primer lugar, el hidróxido de sodio, en segundo lugar, el silicato soluble y en tercer lugar el agua adicional, sin embargo, se observó que el desperdicio de silicato era mayor por el paso de un recipiente a otro.

#### **6.1.2 Mezcla de solución activadora proceso 2.**

Como segundo procedimiento se agregaron el hidróxido de sodio y luego el agua al recipiente en el cual se encontraba el silicato soluble, sin embargo, tampoco produjo

los resultados esperados en razón a que las hojuelas de hidróxido no se diluían completamente y se adherían al fondo del recipiente.

### **6.1.3 Mezcla de solución activadora proceso 3.**

Se usó una tercera forma de realizar el proceso, se agregó el agua al recipiente en el cual se encontraba el silicato soluble, y posteriormente las hojuelas de hidróxido diluyendo así de una mejor manera los componentes.

Los 2 equipos utilizados para la mezcla se usaron en su máxima revolución para obtener un mejor resultado, revolución equivalente a 2500 rpm en lo referente al vortex y de 2400 rpm para la mesa vibratoria Humboldt, como reflejan los anexos 5 y 6 respectivamente.

### **6.1.4 Tiempos de mezcla de la solución.**

Además, se probaron diferentes tiempos de mezcla, se hizo para el caso de la solución alcalina una mezcla de 5 minutos, una con 10 minutos y otra con 15 minutos a medida que se aumentaba el tiempo de mezclado se obtenía como producto final una solución con una mayor trabajabilidad, pues los componentes se disolvían y mezclaban más homogéneamente, aunque la diferencia entre las mezclas de 10 a 15 minutos no tuvo mayor variabilidad.

### **6.1.5 Tiempo de reposo de la solución activadora.**

A partir de la literatura investigada se decidió incluir un cambio en la preparación de la solución, el cual consistió en dejar en reposo la solución durante 12 horas luego de ser mezclada y luego proceder a combinarla con la ceniza puesto que se obtendrían mejores resultados en el proceso de geopolimerización, por lo tanto las mezclas de la solución alcalina se realizaban con 12 horas de anticipación a la combinación con la ceniza, en el apartado 7.1 se puede observar su influencia en los geopolimeros obtenidos.



### 6.1.6 Mezcla de la solución activadora con aditivos.

Finalmente se propuso la adición de un superplastificante llamado plastocrete, en razón a la necesidad de mejorar la manejabilidad del geopolímero en estado fresco. La colocación de dicho superplastificante provocó un nuevo procedimiento para el caso en el cual se aplican aditivos como el mencionado.

Se determinó aplicar el aditivo con una relación del uno por ciento de la ceniza utilizada en la mezcla; este superplastificante se disolvió en la solución activadora pasadas las 12 horas de reposo y se llevó a un proceso de mezcla, en el mismo equipo en que se realizó la mezcla inicial de la solución, durante 10 minutos, se decidió llevar a cabo el procedimiento de esta manera para evitar alteraciones en el proceso de geopolimerización por la adición del aditivo.

*Ilustración 9. Mezcla de solución activadora incluyendo superplastificante*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 10. Mezcla de solución activadora sin superplastificante*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 11. Mezcla de solución mediante mesa vibratoria*



*Fuente. El autor.*

## 6.2 PREPARACIÓN DE AGREGADO FINO

Este procedimiento se realizó para el caso de las mezclas de mortero, ya que al incluir el agregado fino se tuvo que asegurar que se tratara de una arena estandarizada, por lo cual se llevó a cabo un lavado sobre tamiz 200 para eliminar las partículas de materiales finos como limos y arcillas, siguiendo el procedimiento establecido en la norma NTC 78, además se llevó la arena a un estado saturado

superficialmente seco justo antes de comenzar la mezcla con los demás componentes del geopolímero puesto que era de suma importancia procurar no aportar ni restarle agua a la mezcla este procedimiento se realizó en base a lo establecido en la norma NTC 237.

*Ilustración 12. Preparación del agregado fino.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 13. Agregado fino en estado SSS*



*Fuente. El autor*

### **6.3 MEZCLA DE MATERIAL ALCALINIZANTE CON CENIZA VOLANTE**

Los procesos de mezcla entre el material precursor de aluminosilicatos (ceniza volante) y el material alcalinizador (solución activadora) se llevó a cabo con los equipos aportados por la universidad y mediante los cuales se realizan mezclas con cemento portland convencional, el equipo suministrado fue una amasadora planetaria marca Hobart N50, dicha amasadora se debe usar con unos topes mínimos y máximos de material a mezclar, puesto que si se usan cantidades muy pequeñas de materiales las aspás que conforman el equipo no mezclarán los materiales; de igual forma en caso de usarse con cantidades que excedan el máximo recomendado se provocará un aumento en la carga de la mezcla y puede generar daños en el motor del equipo o sobrecalentamientos, además que podría provocar pérdidas de material por rebose del contenedor de la amasadora.

En la presente investigación y a partir de la literatura consultada se determinó que dichos topes máximos y mínimos se dan en función del peso total de la fracción sólida de la mezcla, para el caso de pastas de geopolímeros en función del peso de la ceniza volante, para el caso de morteros de geopolímeros se dará en función del peso total de la ceniza volante junto con la arena; como mínimo las mezclas se deben hacer con 300 gr de ceniza volante según los resultados que se obtuvieron en la prueba piloto, en la cual se llevó a la amasadora una mezcla con un peso de ceniza volante menor a 100 gr y no se logró realizar la mezcla y aun así al

aumentarla a 200 gr se pudo obtener una mezcla muy heterogénea; por otra parte se tiene un estimativo de 1500 gr de ceniza volante como tope máximo para la mezcla teniendo en cuenta la ficha técnica de la amasadora.

Como en las fases previas se realizó una evaluación de diferentes procedimientos durante la ejecución de la mezcla de la ceniza volante con la solución activadora, en los cuales se variaron tiempos de mezcla, el orden en que se iban agregando los mismos y las velocidades usadas en el equipo, ya que se pudo observar que el proceso de mezcla pasa por diferentes etapas y estas se dan en función de los factores mencionados, dichas fases serán descritas a profundidad más adelante en este capítulo; los procedimientos se encuentran con más detalle a continuación.

### **6.3.1 Mezcla de la ceniza con solución alcalina proceso 1.**

En primer lugar, se llevó a cabo la mezcla durante 10 minutos con la amasadora planetaria incluyendo primero la fracción sólida en su totalidad y posteriormente la solución alcalina y con el equipo en la velocidad dos correspondiente a una velocidad intermedia con 281 rpm, pero no se llegó a obtener una mezcla homogénea como se esperaba, por el contrario, se fraccionó, en razón a que aparentemente una parte de la ceniza absorbió el material alcalinizador y no permitió que se llevara a cabo la mezcla de forma homogénea con todo el material.

### **6.3.2 Mezcla de la ceniza con solución alcalina proceso 2.**

Como un segundo procedimiento, se optó por incluir primero la solución alcalina y gradualmente, mientras se tenía el equipo en velocidad uno, velocidad baja a 136 rpm, se fue agregando la ceniza durante 5 minutos y cuando se agregó en su totalidad, finalizados los 5 minutos, se aumentó la velocidad de mezclado a la velocidad dos a 281 rpm y se mezcló durante 10 minutos se observó un mejor resultado en el proceso de mezclado en cuanto a la consistencia que iba adquiriendo la mezcla, sin embargo fue hasta el final de los 10 minutos de mezclado que se logró observar cómo iba alcanzando trabajabilidad la mezcla más sin embargo no era la trabajabilidad óptima.

### **6.3.3 Mezcla de la ceniza con solución alcalina proceso 3.**

Como parte del tercer procedimiento se procedió entonces a aumentar el tiempo de mezcla de 5 minutos en 5 minutos hasta llegar a un tiempo de mezcla total de 30

minutos. Lo que se observó durante dicho procedimiento fue que al aumentar de 10 a 15 minutos el tiempo de mezcla luego de finalizar la adición de la ceniza volante se llegó a obtener mayor homogeneidad en la mezcla y lo mismo sucedió al aumentar de 15 a 20 minutos dicho tiempo de mezclado, sin embargo al aumentar de 20 a 25 minutos visualmente se tenía el mismo resultado, es pertinente dilucidar que previo al tiempo de mezcla que se menciona, siempre se llevó a cabo la colocación de la ceniza volante durante 5 minutos en el recipiente de la amasadora con la solución activadora mientras se tenía el equipo en la velocidad baja a 136 rpm.

*Ilustración 14. Amasadora planetaria Hobart N50.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 15. Procedimiento de mezcla*



*Fuente. El autor.*

Valga aclarar que los resultados obtenidos en las diferentes mezclas no tuvieron un comportamiento estándar hasta el momento en que se adiciono un recubrimiento con papel vinipel en la zona superior del recipiente de la amasadora previniendo así la perdida de humedad excesiva en el procedimiento de mezclado puesto que en el proceso de mezclado se genera una reacción exotérmica, producto del mezclado de la solución activadora con la ceniza volante.

#### **6.3.4 Fases del proceso de mezclado entre la ceniza volante y la solución alcalina.**

Durante el proceso de mezcla se pudieron observar algunas fases; dichas fases se discriminaron por el tiempo que transcurría de la mezcla y en general son las siguientes, durante los primeros 5 minutos en los cuales se adicionaba la ceniza volante a una velocidad aproximada de 150 gr por minuto, se iba disminuyendo la humedad de la mezcla hasta que se observaban conglomerados muy secos y de

tamaño reducido que daban la impresión de que la fracción sólida encapsulaba la solución alcalina, posteriormente, durante el proceso de mezclado en la velocidad intermedia a 281 rpm, y con el recubrimiento de vinipel en su lugar, pasados 5 minutos se podía ver que los conglomerados aumentaban su tamaño dando la impresión de que se comenzaba a liberar de cierta manera la solución alcalina para mezclarse con el material que no se había mezclado, transcurridos 5 minutos más, era posible identificar que las esferas se habían comenzado a mezclar entre sí para formar lo que se podrían denominar como “láminas” de mezcla y que brindaban una mejor perspectiva de esta, sin embargo aún no estaba en la fase que presenta la mejor homogeneidad, transcurridos 3 minutos se evidenciaba una mezcla con una maleabilidad mayor y con un aspecto vidrioso similar a una resina en estado fresco o líquido pero de color gris oscuro.

*Ilustración 16. Mezcla en proceso con recubrimiento de papel vinipel.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 17. Mezcla en proceso.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 18. Mezcla geopolimérica en su fase final.*



*Fuente. El autor.*

#### **6.4 HOMOGENEIZACION DE LA CENIZA VOLANTE Y EL AGREGADO FINO.**

En la presente investigación también se optó por escalar las mezclas estudiadas a la elaboración de morteros geopoliméricos, en dichas mezclas se determinó que después de la preparación del agregado fino, como se especificó en el apartado 6.2, se realizaría una homogeneización de la arena con la ceniza volante y se realizó mediante la amasadora planetaria activada en la velocidad uno, velocidad baja a 136 rpm, por un tiempo de 10 minutos.

Para cualquier porcentaje de agregado fino utilizado se siguió el mismo procedimiento de homogeneización con la ceniza colocando en primer lugar la

ceniza y luego la arena en estado saturado superficialmente seco, pasados los 10 minutos de mezcla correspondientes se pasa a un recipiente, para posteriormente llevar a cabo la mezcla con el material alcalinizador como se describió previamente.

## 6.5 ENCAPSULADO DE LAS MEZCLAS.

Finalizado el proceso de mezclado y teniendo moldes listos para la elaboración del muestreo se procedió a realizar la colocación del material en dichos moldes y posteriormente realizar una compactación por medio de una varilla redondeada, con el fin acomodar la mezcla en el volumen completo del molde, procurando así disminuir el exceso de poros presentes en las probetas.

Mediante el equipo vortex 3 marca ika se induce la liberación de aire, debido a la baja maleabilidad del material y a la cantidad de poros presentes en las muestras, este se acciona en su máxima velocidad, la cual es de 2500 rpm durante 1 minuto y medio por cada probeta, para finalmente por medio de una plaqueta de vidrio realizar un enrazado procurando dejar la superficie lo más lisa posible y paralela con la cara inferior de la probeta y retirando los excesos de material de las probetas.

*Ilustración 19. Vibrado de probetas*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 20. Enrazado de probetas.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 21. Mezclas encapsuladas.*



*Fuente. El autor.*

## 6.6 CURADO Y ALMACENAMIENTO.

Finalmente, para completar la elaboración de los geopolimeros se recurrió a un proceso de curado de las mezclas, evaluando diferentes formas de llevarlo a cabo,

puesto que en la infografía recolectada solo se pudo encontrar las temperaturas y el tiempo empleado en diferentes investigaciones.

#### **6.6.1 Curado número 1.**

En primer lugar, durante las mezclas piloto, se obtuvieron resultados mediante un curado de las mezclas a temperatura ambiente de la ciudad de Tunja la cual oscila entre los 13°C y los 18°C con una humedad natural del 80% aproximadamente. La metodología usada para dicho proceso de curado fue almacenar las probetas en un recipiente con un grado intermedio de hermeticidad ante el medio ambiente tapadas y sin ser expuestas al sol, se dejaron durante 72 horas y posteriormente fueron removidas de sus respectivos moldes; en efecto cada una de las mezclas y muestras fraguaron y endurecieron, pero no llegaron a un grado de dureza significativo.

#### **6.6.2 Curado número 2.**

En este proceso se llevó a cabo el curado de las muestras siguiendo un procedimiento compuesto por 3 fases, la primera un fraguado inicial a temperatura ambiente previniendo la perdida de humedad en las probetas mediante el cierre hermético de los recipientes auxiliares usados en el proceso, esta primera fase es realizada durante 12 horas; en segunda instancia se situaron las probetas en el mismo estado de la fase anterior, puestas en los moldes auxiliares y cerrados, durante 48 horas en el horno de secado a una temperatura constante de 60°C y posteriormente fueron retiradas las tapas de los moldes auxiliares manteniéndolos aun en el horno a una temperatura constante de 60°C durante 12 horas, finalizando así el segundo procedimiento evaluado en lo que respecta al curado.

#### **6.6.3 Curado número 3.**

Finalmente se llevó a cabo un procedimiento muy similar al anterior, pero modificando los tiempos de cada fase de la siguiente manera: fase 1 en la cual se mantuvo la duración de 12 horas a temperatura ambiente, en la segunda fase se modificó el tiempo y paso de 48 horas a 24 horas en el horno a 60°C cerrados herméticamente y la tercer y última fase se lleva a cabo durante 24 horas en el horno

a 60°C sin el cierre hermético, a diferencia del proceso número 2 que se realizó dicha fase durante 12 horas.

La determinación del uso de la fase 2 durante el proceso de curado número 2 y 3, se da en función del método que se empleó en investigaciones previas denominado "*Curing in covered moulds*"<sup>19</sup> sin embargo, fue modificado con el uso de recipientes auxiliares para lograr su colocación en el horno, puesto que las probetas se pueden acomodar de una mejor manera; además, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos por Criado, Fernández-Jiménez y Palomo<sup>20</sup> en el año 2010 donde se tienen mejores resultados en todos los aspectos realizando el curado con el primer método estudiado en dicha investigación, la cual se realizó con moldes auxiliares cerrados herméticamente.

Las dimensiones de los moldes deben ser de por lo menos 14 cm de diámetro y 7 cm de alto las dimensiones pueden ser variables en función del tamaño de los moldes usados en las probetas, en la presente investigación se usaron dichos tamaños para los moldes de 3,3 cm de diámetro y 5,5 cm de alto; complementando la información anterior es muy importante mencionar que el curado realizado en las 3 fases se sustenta con investigaciones previas en las que se determinó que durante el proceso de fraguado y endurecido es importante conservar la humedad puesto que este factor previene fraguados rápidos<sup>21</sup>, como bien se sabe el proceso de curado de cualquier tipo de matriz ya sea a base de cemento portland o geopolimérica o cualquier otro debe ser controlado con el fin de evitar fisuraciones por la pérdida desmedida de humedad de las probetas; en cuanto a la tercera fase del curado se pretendió complementar el proceso mediante la liberación del agua contenida en las probetas, puesto que la presencia de esta en el interior de las probetas genera alteraciones en el comportamiento mecánico del material endurecido al igual que por prevenir cualquier fenómeno de expansión del material.

---

<sup>19</sup> KOVALCHUK, G., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: "Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development-Part II" Fuel, 86, pp. 315-322 (2007). <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>

<sup>20</sup> CRIADO, M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: "Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description" Elsevier; Fuel 89 (2010).

<sup>21</sup> KOVALCHUK, G., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: "Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza" revista materiales de construcción, (2008). <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.101>



*Ilustración 22. Disposición de probetas para curado*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 23. Curado de probetas en horno de secado a 60°C*



*Fuente. El autor.*

Finalizado el proceso de curado las muestras se encuentran listas para posteriormente realizarle los ensayos de resistencia mecánica tales como resistencia a la compresión en la maquina universal y ensayo de tracción indirecta, en las fechas que se determinen; por lo tanto en primer lugar se procedió a retirar los moldes procurando no generar daños en las muestras, puesto que se tuvo que abrir dicho molde mediante un corte, finalmente se procede a almacenar las muestras en un depósito en el cual no se vean afectadas por cambios bruscos de temperatura o por accidentes que generen fisuras o fallas de las probetas.

En una fase final se determinó la posibilidad de escalar las mezclas realizadas de pastas a morteros y se llegó a considerar la posibilidad de escalar a concretos, sin embargo, se determinó no viable el escalado a concreto, debido a que se hacen necesarios más estudios para hacerlo de manera óptima.

## **7. FACTORES QUE PUEDEN INCIDIR EN LA RESISTENCIA DEL GEOPOLÍMERO EN LO REFERENTE AL PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN.**

Existen diferentes factores que inciden de manera directa e indirecta en las propiedades mecánicas de una matriz geopolimérica, las cuales comienzan desde las características fisicoquímicas del material precursor y de los químicos utilizados para la activación alcalina, hasta los diferentes procesos por los que se pasa para la elaboración de geopolímeros.

El trabajo de investigación se limita a la metodología aplicable para la elaboración de geopolímeros, considerando así factores ligados a procedimientos que inciden en la resistencia de la matriz geopolimérica; razón por la cual es necesario el conocimiento de la influencia de las particularidades encontradas durante la investigación.

### **7.1 INFLUENCIA DEL PROCESO DE PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN ALCALINA.**

Con referencia a los diferentes procedimientos evaluados durante la preparación de la solución alcalina, se debe destacar la mejora obtenida a partir de la variación en el tiempo transcurrido desde la preparación de dicha solución hasta su uso en la mezcla con la ceniza volante, como bien se especificó en las fases previas se realizaron mezclas con la solución preparada 12 horas antes de su uso en la mezcla con la ceniza y mezclas con la solución preparada instantes previos a su uso en la mezcla con la ceniza volante.

Los resultados socializados en las tablas 3 y 4 corresponden a dos mezclas llevadas a cabo en la investigación, A1 que corresponde a la mezcla con la solución alcalina preparada 12 horas antes de su uso en la mezcla con la ceniza volante y B1 a la mezcla realizada con la solución alcalina preparada justo antes de hacer uso de ésta en la mezcla con la ceniza volante, los parámetros de entrada y diseños de mezcla son idénticos a los referenciados en el capítulo 5.3.

Tabla 3. Esfuerzo máximo mezcla A1.

Mezcla A1	
probeta	esfuerzo max (Mpa)
1	4,46
2	4,55
3	2,80
4	3,97
5	2,69
6	3,10
7	4,10
8	3,41
promedio	3,64

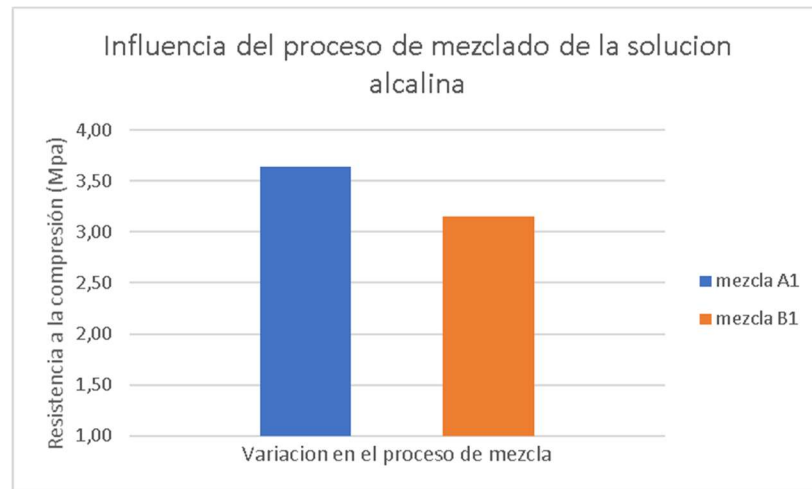
Fuente. El autor.

Tabla 4. Esfuerzo máximo mezcla B1.

Mezcla B1	
probeta	esfuerzo max (Mpa)
1	2,45
2	2,72
3	4,63
4	2,81
promedio	3,15

Fuente. El autor.

Grafico 1. Influencia del proceso de mezclado de la solución alcalina.



Fuente. El autor.

Como se evidencia en el grafico 1 la mejora en las propiedades mecánicas de la matriz geopolimérica no es muy grande, pero si resulta significativa con relación a las resistencias promedio obtenidas en la investigación. El aumento de la resistencia a la compresión fue de un 13 %, por lo tanto, esta variable debe ser tomada en cuenta a la hora de determinar a qué fases del procedimiento para la elaboración de un geopolímero se le debe dar mayor relevancia para producir mejores resistencias.

## 7.2 INFLUENCIA DEL TIPO DE CURADO UTILIZADO.

Uno de los principales factores para tener en cuenta durante la elaboración de geopolímeros es el curado, puesto que se trata de un proceso crucial para concluir

de manera exitosa la geopolimerización del material precursor utilizado y eliminar el agua presente en la mezcla que actuó como medio de transporte de los químicos usados para la solución alcalina durante el proceso de geopolimerización.

Los resultados presentados en las tablas 5,6 y 7 son los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de mezclas con tres métodos de curado evaluados y corresponden a los siguientes procedimientos; el método de curado número uno consta de una sola fase a temperatura ambiente, el procedimiento de curado número dos posee tres fases, al igual que el procedimiento número tres; la diferencia entre estos últimos radica en los tiempos destinados a cada fase, porque en el procedimiento número 2 se dejaron las probetas en la primera fase durante 12 horas, en la segunda fase transcurrieron 48 horas y en la fase final 12 horas; mientras que en el tercer método la fase uno tiene una duración de 12 horas, la fase 2 dura 24 horas y la fase final tiene una duración de 24 horas, estos métodos son descritos de forma completa en el capítulo 6.6.

*Tabla 5. Esfuerzo máximo método de curado #1*

Curado #1	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	2,45
2	2,72
3	4,63
4	2,81
promedio	3,15

*Fuente. El autor.*

*Tabla 6. Esfuerzo máximo método de curado #2*

Curado #2	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	4,46
2	4,55
3	2,80
4	3,41
5	2,69
6	4,10
promedio	3,68

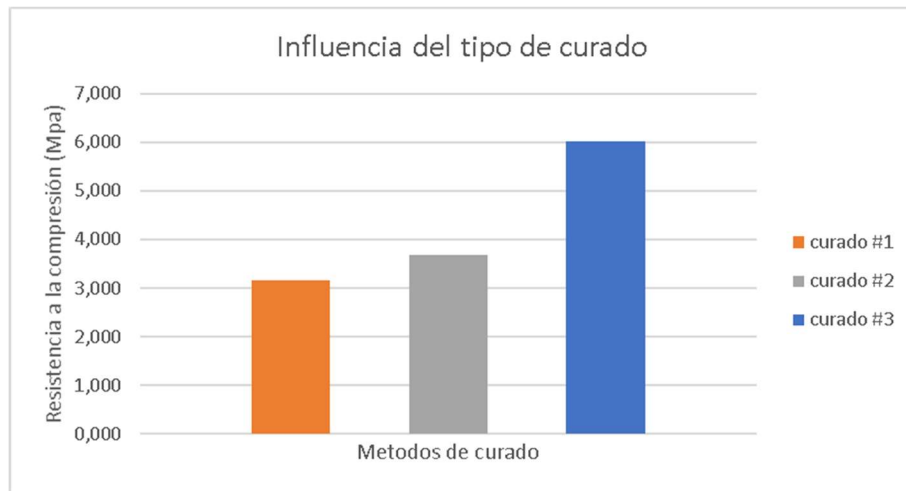
*Fuente. El autor.*

*Tabla 7. Esfuerzo máximo método de curado #3*

Curado #3	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	5,23
2	6,40
3	6,03
4	6,17
5	6,85
6	5,37
promedio	6,01

*Fuente. El autor.*

Grafico 2. Influencia del tipo de curado.



Fuente. El autor.

Como se aprecia a partir del grafico dos: influencia del tipo de curado, el incremento presentado del método 1 al método 2 en la resistencia a la compresión es mínimo, pues representa 17% pero aun así sigue siendo representativo; en el caso del aumento generado del método 2 al método 3 es mucho mayor y más representativo ya que equivale a un aumento del 63 % mientras que el aumento en la resistencia a la compresión comparando los resultados obtenidos por el método 1 y el método 3 son abismales, puesto que representan un 90%. Como se evidencia claramente la incidencia del curado en la resistencia a la compresión es muy alta y da pie a entender que el curado es un procedimiento crucial en la geopolimerización y en la obtención de un material con una calidad óptima.

En lo referente a los procedimientos y su relación con las propiedades mecánicas se puede reducir básicamente a los dos aspectos analizados previamente, sin embargo, se recomienda seguir todos los procesos como se establecen en el procedimiento guía elaborado en el capítulo 8 que se presenta posteriormente, o en su defecto con procesos optimizados a partir de dicha guía, puesto que su importancia radica en la obtención de una mezcla homogénea y con la manejabilidad adecuada. El hecho de no considerar lo anterior puede provocar una falencia en las propiedades mecánicas de la matriz inducidas de forma indirecta por el procedimiento.

Como se mencionó al principio del presente capítulo existen muchas variables que inciden en las propiedades mecánicas de una matriz geopolimérica; una de estas

fue inferida a partir de los resultados que se relacionan en las tablas 8,9 y 10 y se trata de la presencia de un aditivo para mejorar la manejabilidad del material en estado fresco y el porcentaje de uso de este.

*Tabla 8. Esfuerzo máximo mezcla 0% superplastificante*

0% de superplastificante	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	3,57
2	2,50
3	3,50
4	4,22
5	3,45
promedio	3,45

*Fuente. El autor.*

*Tabla 9. Esfuerzo máximo mezcla 0,5% superplastificante*

0,5% de superplastificante	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	2,45
2	2,72
3	4,63
4	2,81
promedio	3,15

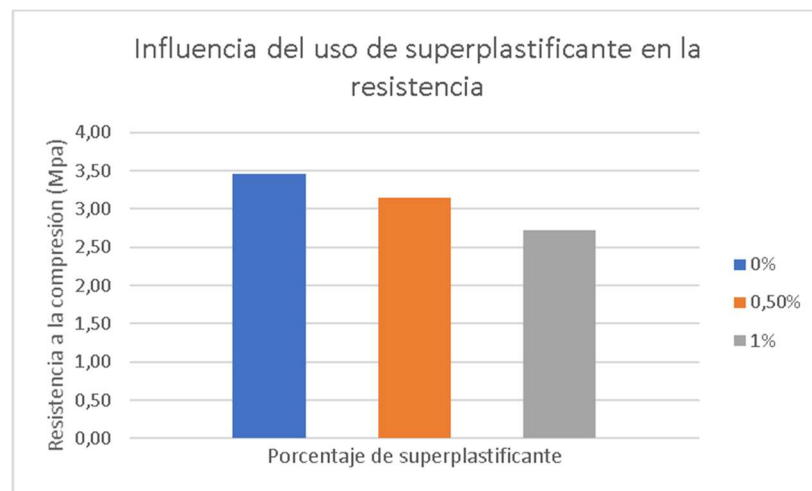
*Fuente. El autor.*

*Tabla 10. Esfuerzo máximo mezcla 1% superplastificante*

1% de superplastificante	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	3,94
2	2,62
3	2,31
4	2,52
5	2,24
promedio	2,72

*Fuente. El autor.*

*Grafico 3. Influencia del uso de superplastificante en la resistencia*



*Fuente. El autor.*

El uso de un aditivo de la naturaleza del plastocrete tiene una incidencia en la resistencia inversamente proporcional como se puede apreciar en el grafico anterior, esto se puede dar en consecuencia de la disminución de la alcalinidad de la solución activadora, en el caso de la mezcla que no se usó el aditivo tiene la mayor resistencia registrada, mientras que en el caso en el que se usó el aditivo en un 0.5% se disminuyó la resistencia en un 9,5%, y en el caso en el que se usó el aditivo al 1% del peso de la ceniza, se disminuyó en un 26% la resistencia con

relación a la mezcla inicial y en un 17% con relación a la mezcla que contiene un 0,5% del aditivo. Es recomendable hacer uso de dicho aditivo en un 0.5% de la ceniza volante presente en la mezcla, cuando se requiera, aun con la disminución de la resistencia que esto acarrea, puesto que las mezclas sin este generan resultados muy dispersos que no permiten tener uniformidad en las mezclas por las características de la ceniza volante utilizada en la presente investigación.

## **8. PROCEDIMIENTO OPTIMIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE UN GEOPOLÍMERO**

Luego de la evaluación de los diferentes procedimientos y metodologías estudiadas en el capítulo 6 y de la determinación de los factores que pueden incidir en las propiedades mecánicas en el capítulo 7, fue posible determinar de manera más clara y concisa cual es el procedimiento optimizado para la obtención de un geopolímero, teniendo en cuenta las materias primas disponibles en la región y los equipos y herramientas usados comúnmente. Dicho procedimiento hace parte la fase preliminar de una serie de investigaciones que se pueden realizar a partir de este material y derivados del presente proyecto investigación, por lo tanto, está sujeto a tener ajustes y optimizaciones en el transcurso de dichas investigaciones.

### **8.1 NORMAS BÁSICAS DE SEGURIDAD.**

Puesto que los procedimientos a seguir se realizarán en contacto directo con los materiales y algunos de ellos pueden ser nocivos para la salud por sus características, se harán ciertas recomendaciones en uso de materiales y los implementos de seguridad a utilizar.

Para todos los procesos relacionados con transporte y manipulación de químicos (hidróxido de sodio y silicato soluble) o del material precursor para el caso actual ceniza volante, se debe hacer uso de guantes de látex, mascarilla de seguridad y gafas de seguridad; además de las recomendaciones básicas de seguridad en un laboratorio: prohibido fumar, comer o beber en el laboratorio, asimismo del uso de zapato cerrado y bata.

### **8.2 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS.**

- Amasadora planetaria (Hobart N50).
- Vibrador vortex 3 marca ika.
- Balanza con precisión de 0,01 g.
- Cronometro.
- Bisturí quirúrgico, cucharas y espátulas (tamaño pequeño).
- Plaquetas de vidrio.
- Horno de secado.



### 8.3 PROCEDIMIENTO.

Para comenzar se debe realizar el pesaje de los materiales que componen la solución alcalina en función del diseño de mezcla previamente realizado, este se puede llevar a cabo mediante el diseño de mezcla descrito en el capítulo 5.3 y que se encuentra de igual forma en el anexo 8; luego de pesados los materiales se debe proceder a diluir las hojuelas de hidróxido de sodio en el agua y posteriormente a incluir esta mezcla en el silicato soluble de sodio, a continuación se debe colocar una lámina de papel vinipel entre la tapa del recipiente y el recipiente procurando tener la solución lo más hermética posible, la mezcla será llevada al proceso de vibración mediante el equipo vortex 3 durante 10 minutos en la velocidad 6 la cual corresponde a una velocidad de 2500 rpm, es necesario realizar el proceso de mezcla de la solución alcalina con 12 horas de anterioridad a la elaboración del geopolímero para brindar mejores resultados de las mezclas en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas.

Pasadas 12 horas  $\pm$  2 horas desde la mezcla de la solución alcalina se procede a realizar la mezcla del material precursor de aluminosilicatos con la solución activadora, para el caso de la presente investigación, en la cual se hizo necesaria la implementación de un aditivo para mejorar la manejabilidad de la mezcla en estado fresco llamado plastocrete, se realizó durante 10 minutos la mezcla de dicho aditivo con la solución alcalina previamente mezclada, en el mismo equipo utilizado en la fase anterior, en caso de no utilizar aditivos se obviara este paso y se procederá al siguiente.

Como tercer paso se llevará a cabo la homogeneización de la ceniza con cualquier tipo de material que se vaya a adicionar, es el caso por ejemplo de la adición de arena para elaborar morteros geopoliméricos, en este caso para la elaboración de morteros se llevó la ceniza a la amasadora planetaria junto con la arena en estado saturado superficialmente seco y se mezcló durante 10 minutos en velocidad 1 correspondiente a velocidad baja a 136 rpm. En el caso en que se vayan a mezclar pastas de geopolimeros se obviará este paso y se procederá a realizar el siguiente.

En cuarto lugar, en caso de haberse realizado el paso anterior se debe retirar de la amasadora el material precursor (ceniza volante) luego de ser mezclada con algún otro material, para así adicionar como base la solución activadora; posteriormente se adiciona poco a poco la ceniza en la amasadora planetaria mientras se tiene el equipo activado en velocidad 1, la adición de la ceniza implica un tiempo de 5 minutos sin apagar el equipo, inmediatamente después de finalizado el proceso de

adición de la ceniza se cambia la velocidad del equipo a la velocidad 2 correspondiente a una velocidad intermedia de 281 rpm y se procede a colocar la membrana de papel vinipel para evitar la pérdida de humedad de la mezcla, dicho proceso de mezcla en velocidad intermedia debe llevarse a cabo durante 20 minutos.

El quinto paso corresponde a la colocación de las mezclas en los moldes, luego de realizar el proceso de mezclado y habiendo concluido la tercera parte del procedimiento de geopolimerización aproximadamente, se deben llevar a los moldes las mezclas en estado fresco justo después de finalizado el cuarto paso, dicho proceso se lleva a cabo mediante las cucharas y espátulas mencionadas en el principio del capítulo, se lleva el material al molde y se coloca con un exceso para que al finalizar el proceso sea más fácil el enrasado, posteriormente se debe realizar un proceso de apisonamiento mediante una varilla procurando liberar la mayor cantidad de aire que se encuentra atrapado en la probeta para disminuir los poros que tendrá esta luego de fraguar y endurecer este apisonamiento se realiza  $30 \pm 5$  veces; complementándolo con un vibrado en el vortex durante 1,5 minutos por cada probeta en la máxima velocidad equivalente a 2500 rpm y finalmente luego de liberar dichos poros, se procede a enrasar las muestras mediante las plaquetas de vidrio tratando de generar una superficie lo más plana posible y paralela con la base del molde y retirando los excesos de material presentes.

Como sexto paso, se llega al proceso de curado, en este proceso se van a realizar tres fases, en la primera fase se trata de permitir a las probetas llevar a cabo su fraguado inicial a temperatura ambiente para no exponer las probetas a cambios de temperaturas drásticos, se llevan las probetas encapsuladas a recipientes auxiliares, en el caso de la presente investigación estos tenían las dimensiones que se relacionan a continuación, 14 cm de diámetro y 7 cm de alto las dimensiones pueden ser variables en función del tamaño de los moldes usados en las probetas, para este caso, dichos tamaños se usaron para los moldes de encapsulado de 3,3 cm de diámetro y 5,5 cm de alto, se cierran herméticamente dichos recipientes y se mantienen a temperatura ambiente durante 12 horas. Finalizada esta primera fase se pasa a colocar los recipientes auxiliares en el mismo estado en que se llevó a cabo la fase anterior pero esta vez son llevados al horno de secado a una temperatura de 60°C constantes y por un tiempo de 24 horas en dicha fase se realiza un control de la humedad natural en que se encuentran las probetas mediante el uso del recipiente auxiliar en el que se encuentran estas, con el fin de evitar fraguados excesivamente rápidos; finalmente a los moldes auxiliares se les retiran las tapas y se dejan a la misma temperatura de 60°C en el horno de secado durante 24 horas más, en este proceso se le permite a la matriz geopolimérica terminar de retirar los excesos de agua, que se encuentran en la estructura interna

del geopolímero, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas; finalizado el curado, la geopolimerización ha finalizado.

Para concluir el procedimiento de elaboración de geopolímeros se realiza el desmoldado de las probetas haciendo un corte directamente en el molde procurando no incidir en la integridad de la probeta como tal y posteriormente son almacenadas para su posterior uso en los ensayos que se le vayan a practicar como ensayos a compresión y de tracción indirecta.

Se recomienda para el caso de las mezclas de mortero geopoliméricos, dados los resultados obtenidos en la investigación, usar un porcentaje de arena inferior al 50% puesto que para mayores porcentajes la mezcla no obtenía la maleabilidad en estado fresco que se esperaba.

## **9. OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS GEOPOLIMEROS ELABORADOS A PARTIR DE MATERIAS PRIMAS DISPONIBLES EN LA REGIÓN.**

Dentro de los posibles factores que influyen en la resistencia obtenida por una mezcla de geopolímero hay varias que tienen la posibilidad de ser optimizadas. Durante la presente investigación se estudiaron dos de ellos, los cuales se describen a profundidad a continuación:

### **9.1 ADICIÓN DE FIBRAS DE CÁÑAMO INDUSTRIAL.**

En la actualidad el contexto socioeconómico del país está atravesando por una transición del conflicto armado hacia la resocialización de las personas que se vieron afectadas de cualquier forma directa o indirectamente. Algunas personas que se encuentran en dicho proceso son las personas encargadas de realizar cultivos ilícitos de cannabis como único medio de subsistencia pero que eran financiados por dichos grupos al margen de la ley; una de las alternativas que se ha propuesto por parte de algunos investigadores para ofrecer formas de solventar dichas familias económicamente es el uso de estas plantas con fines industriales; a pesar de que en el país el acceso a este tipo de fibra no es fácil en grandes cantidades por la prohibición existente de la tenencia de este tipo de cultivos, con fines de la investigaciones y proyectando su uso industrial en un futuro, si favorecen las condiciones legislativas en el país. Se logró la adquisición de esta fibra, por la gestión del grupo de investigación GICA de la UPTC.

Como bien se sabe las propiedades de este tipo de plantas no solamente tiene aplicación con fines recreativos, sino que también tiene propiedades medicinales y en aplicaciones de diferentes sectores industriales se ha encontrado que las fibras de cáñamo tienen propiedades mecánicas favorables para su uso como micro fibras o como fibras para la industria textil. De forma general en la industria de la construcción a lo largo de la historia se ha propuesto la aplicación de fibras de origen sintético y algunas de origen orgánico en matrices de concreto con cemento portland con el fin de mejorar la resistencia a la tensión de estas ya que se considera el punto débil de este material. Por lo anterior se resolvió evaluar si la utilización de fibras de cáñamo industrial produciría cambios favorables en las propiedades mecánicas de la matriz geopolimérica, tanto en pastas como en morteros evaluando el comportamiento de las mezclas tanto a flexión como a compresión.

En primer lugar, se determinó el procedimiento a seguir para su implementación en las pastas y en los morteros geopoliméricos, durante el paso número tres descrito en el capítulo 8.3, se lleva a cabo su mezcla con el material precursor de aluminosilicatos (ceniza volante) y para el caso de los morteros con el agregado fino simultáneamente, la adición de dicha fibra se llevó a cabo en esta fase del procedimiento para evitar la acumulación de esta en ciertas zonas de la mezcla y la ausencia en otras zonas. El porcentaje de fibra de cáñamo utilizado fue del 0,5% del peso total de la fracción sólida de la mezcla, esta fue determinada a partir de estudios realizados con la implementación de fibras de bagazo de caña de azúcar en matrices de concreto con cemento portland, en la cual se estudiaron entre otras variables el comportamiento de las matrices con la adición de diferentes porcentajes de dicha fibra, arrojando como resultado la disminución de la resistencia a la compresión cuando se adicionaron porcentajes superiores al 0,5% mientras que si se usaba este porcentaje de fibra se obtenía un plus en la resistencia a la compresión de la probeta.

*Ilustración 24. Fibra de cáñamo industrial.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 25. Mezcla de material precursor, arena y fibra de cáñamo industrial.*



*Fuente. El autor.*

### **9.1.1 Resultados**

A partir de las mezclas realizadas se llevaron a cabo ensayos de compresión y tracción indirecta para determinar así las propiedades mecánicas obtenidas en los geopolimeros y la incidencia generada por la implementación de dichas fibras. Los resultados presentados en las tablas 11, 12, 13 y 14 hacen referencia a las mezclas de morteros, la mezcla patrón se realizó con un porcentaje de agregado fino de un 50%, con superplastificante al 0,5%, relación a/c de 0,35 y sin incluir fibras de cáñamo industrial; la mezcla B tiene el mismo porcentaje de agregado fino, con superplastificante al 0,5%, relación a/c de 0,35 y con un 0,5% de fibras de cáñamo industrial.

Tabla 11. Resistencia a compresión de mortero con mezcla patrón.

Mezcla Patron	
Compresion	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	4,1481
2	4,0045
3	3,8981
4	3,2814
5	3,0950
prom.	3,6854

Fuente. El autor.

Tabla 12. Resistencia a compresión de mortero con mezcla B.

Mezcla B con fibras 0.5%	
Compresion	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	4,2098
2	4,9101
3	4,7436
4	4,4224
5	3,7108
prom.	4,3993

Fuente. El autor.

Tabla 13. Resistencia a tensión de mortero con mezcla patrón

Tracción indirecta mezcla patrón	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	4,54
2	5,54
3	5,82
4	5,11
5	4,55
prom.	5,11

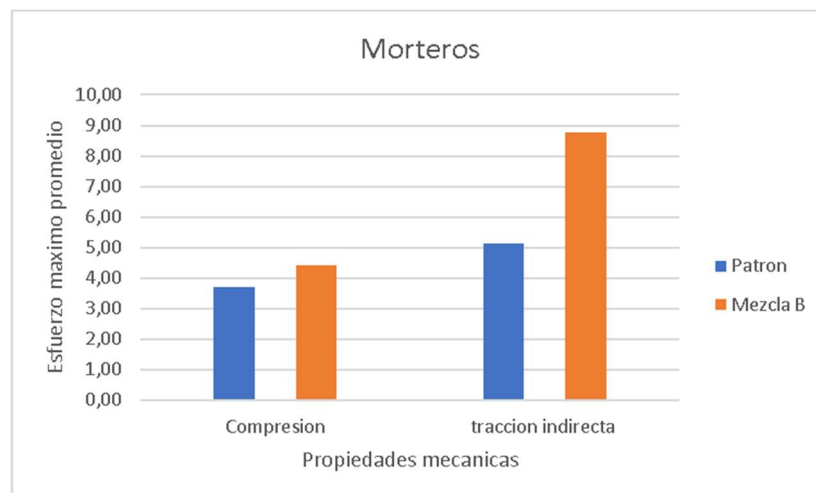
Fuente. El autor.

Tabla 14. Resistencia a tensión de mortero con mezcla B

Tracción indirecta mezcla B	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	7,22
2	8,47
3	9,82
4	9,75
5	8,54
	8,76

Fuente. El autor

Grafico 4. Propiedades mecánicas de las mezclas de morteros.



Fuente. El autor.

El propósito principal de la adición de fibras a cualquier tipo de matriz, a base de cemento portland o de materiales ricos en aluminosilicatos, es aportar de forma

directa en la resistencia a la tensión, puesto que es la mayor falencia de este tipo de elementos; sin embargo, como se puede apreciar en el grafico 4 la optimización tuvo influencia tanto en la resistencia a la compresión como en la resistencia a la tensión; esta optimización tuvo lugar en un 19% en cuanto a la resistencia a la compresión y en un 71% en cuanto a la resistencia a la tensión.

Los resultados presentados en las tablas 15, 16, 17 y 18 que se socializan a continuación, hacen referencia a las mezclas de pastas, la mezcla A se realizó con un porcentaje de superplastificante al 0,5%, relación a/c de 0,35 y sin incluir fibras de cáñamo industrial; la mezcla B tiene superplastificante al 0,5%, relación a/c de 0,35 y con un 0,5% de fibras de cáñamo industrial.

Tabla 15. Resistencia a compresión de mezcla A (pastas).

Mezcla A	
Compresión	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	4,46
2	4,55
3	3,10
4	2,08
5	3,97
prom.	3,63

Fuente. El autor.

Tabla 16. Resistencia a compresión de mezcla B (pastas).

Mezcla B con fibras 0.5%	
Compresión	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	4,09
2	4,01
3	5,26
4	4,41
5	5,49
prom.	4,65

Fuente. El autor.

Tabla 17. Resistencia a tensión de mezcla A (pastas).

Tracción indirecta mezcla A	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	5,94
2	4,31
3	6,54
4	2,96
5	4,78
prom.	4,91

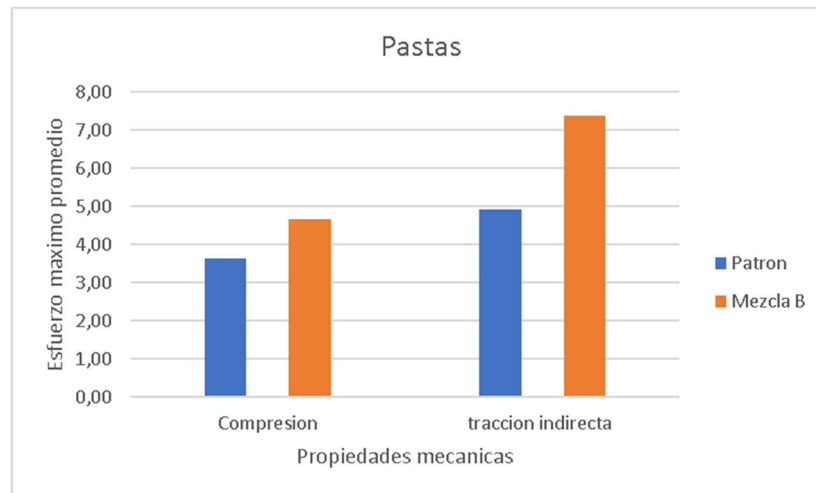
Fuente. El autor.

Tabla 18. Resistencia a tensión de mezcla B (pastas).

Tracción indirecta mezcla B	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	6,91
2	8,26
3	6,60
4	7,07
5	7,97
prom.	7,36

Fuente. El autor.

Grafico 5. Propiedades mecánicas de las mezclas de pastas



Fuente. El autor.

Como se puede apreciar en el grafico 5 al igual que en los morteros para el caso de las pastas la optimización tuvo influencia tanto en la resistencia a la compresión como en la resistencia a la tensión; esta optimización fue equivalente al 28% en cuanto a la resistencia a la compresión y en un 50% en cuanto a la resistencia a la tensión.

Como es evidente la optimización a partir de fibras de cáñamo tiene una relevancia muy amplia puesto que además de haber obtenido porcentajes grandes de optimización con relación a los resultados esperados en lo que respecta a la resistencia a la tensión, se logró mejorar la resistencia a la compresión en un porcentaje importante.

## 9.2 IMPLEMENTACIÓN DE UN TRATAMIENTO TÉRMICO A LA CENIZA VOLANTE.

Debido al alto porcentaje de material orgánico presente en la ceniza (no incinerado) se determinó que era necesario realizar un tratamiento térmico en búsqueda de la disminución de dicho porcentaje y de la mejora general del comportamiento de dicha ceniza, las especificaciones correspondientes a dicho tratamiento térmico fueron determinadas a partir de la fase preliminar de la investigación que se encuentra en proceso por parte del grupo de investigación GICA.



El tratamiento térmico designado para la presente investigación se puede explicar en cinco etapas, en la primera etapa se sumergió en agua la ceniza a tratar durante 12 horas, en la segunda etapa se retiró el agua del material a partir de un tamiz de tela, posteriormente se ingresó el material a un horno durante una hora a una temperatura de 300°C, en la cuarta etapa se procedió a realizar un choque térmico disminuyendo la temperatura intempestivamente vertiendo el material en agua y finalmente en la quinta etapa se retiró el agua absorbida por el material con el tamiz de tela y se ingresó nuevamente al horno durante una hora a una temperatura de 300°C.

*Ilustración 26. Ceniza volante sumergida en agua*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 27. Retiro del agua mediante tamiz de tela.*



*Fuente. El autor.*

*Ilustración 28. Material dispuesto en el horno*



*Fuente. El autor.*

A partir del tratamiento térmico se llevaron a cabo nuevas mezclas, con el fin de establecer su efectividad en la optimización de los geopolímeros, los resultados obtenidos se pueden apreciar en las tablas 19 y 20 que se presentan a continuación, los cuales corresponden a dos mezclas realizadas con ceniza tratada y sin tratar, la mezcla A2 corresponde a la mezcla de un geopolímero con ceniza sin tratar con 0,5% de superplastificante y relación a/c de 0,35; en la mezcla B2 se usó ceniza tratada, con 0,5% de superplastificante y relación a/c de 0,35.

Tabla 19. Resistencia a compresión de mezcla A2 (pastas)

Mezcla A2	
Compresión	
Probeta	Esfuerzo Max (Mpa)
1	4,46
2	4,55
3	3,10
8	2,88
5	3,97
prom.	3,79

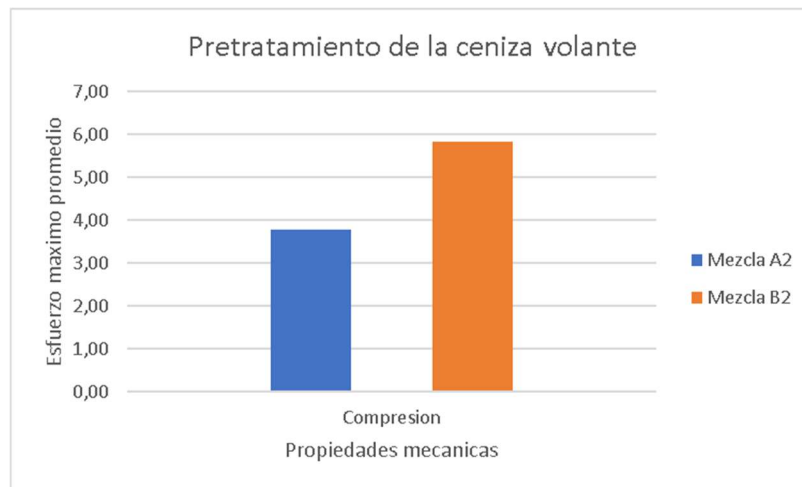
Fuente. El autor.

Tabla 20. Resistencia a compresión de mezcla B2 (pastas)

Mezcla B2	
Compresión	
Probeta	Esfuerzo max (Mpa)
1	5,23
2	6,40
3	6,03
4	6,17
5	5,37
prom.	5,84

Fuente. El autor.

Grafico 6. Optimización mediante tratamiento térmico del material precursor.



Fuente. El autor.

Mediante el tratamiento térmico realizado se obtuvieron mejoras en la resistencia a la compresión del geopolímero, como se puede observar en el grafico numero 6 el aumento de la resistencia fue de un 54%.

**10. APOORTE EN EL DESARROLLO DE UN ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN  
SOBRE GEOPOLIMEROS EL CUAL SE ESCRIBIRÁ DE MANERA  
CONJUNTA CON OTROS INTEGRANTES DEL GRUPO GICA PARA SER  
PUBLICADO EN UNA REVISTA ESPECIALIZADA**

Se presenta un artículo científico titulado OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE GEOPOLIMEROS ELABORADOS CON CENIZA VOLANTE DE LA TERMoeLECTRICA “TERMOPAIPA” que se encuentra en el anexo 7 del presente documento; dicho artículo tiene como fin aportar en el desarrollo de un documento compuesto por diferentes investigaciones realizadas en la UPTC para ser publicado en una revista especializada.

Particularmente se busca socializar la posibilidad de darle valor agregado a las propiedades mecánicas de la matriz mediante el uso de fibras de cáñamo industrial o con un tratamiento térmico realizado a la ceniza, generando así grandes aportes para poder darle aplicaciones en un futuro al uso de la fibra de cáñamo en el sector industrial.

## **APORTES**

Como aporte primordial de la investigación se estableció un procedimiento que puede ser usado como guía para la elaboración de un geopolímero a partir de materiales precursores de aluminosilicatos obtenidos en el departamento de Boyacá y con el uso de equipos y herramientas usadas comúnmente en los laboratorios de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

La presente investigación ha generado como aporte un precedente sobre la implementación de la fibra de cáñamo industrial en una mezcla geopolimérica, para mejorar sus propiedades mecánicas; lo cual beneficiara en un futuro nuevas investigaciones y puede ayudar a impulsar el crecimiento de dicha industria siempre y cuando se mantenga dentro del marco legislativo del país.

Un gran aporte suministrado por la investigación es el escalonamiento de las mezclas de pastas geopoliméricas a morteros geopoliméricos, puesto que se describió el procedimiento y las condiciones que fueron ideales para realizar dicho escalonamiento y será de gran utilidad para futuras investigaciones conocer previamente dichos procedimientos y condiciones ideales.

Finalmente, se está suministrando la posibilidad a personas que deseen incursionar en el tema, que conozcan las variables que tienen una mayor trascendencia en los procedimientos de elaboración de geopolímeros, lo que evitara aumentos en los costos de las investigaciones, pérdida de tiempo con mezclas que no corresponden, avanzar de manera más rápida y dedicarle más empeño a dichas variables que se deben realizar con mayor cautela.

## CONCLUSIONES

La determinación de un procedimiento optimizado para la elaboración de geopolímeros está condicionado a la evaluación de tres aspectos principalmente, en primer lugar una evaluación experimental de los cambios que se aplican a cada mezcla realizada en el momento de la mezcla, una evaluación cuantitativa en lo que respecta a los resultados obtenidos de los ensayos aplicados a las muestras y por último una evaluación cualitativa que describa la forma en que se desarrollaron las mezclas y el resultado obtenido a través de los diferentes procedimientos.

A la hora de determinar el uso o no de superplastificante se debe sopesar la resistencia a la compresión y la maleabilidad de la mezcla; para el caso de la ceniza utilizada en la presente investigación tiene mayor prioridad darle un plus a la mezcla para que esta sea maleable aun cuando se deba sacrificar un 9,5% de la resistencia esperada.

Se evidencio que la fase más crítica del procedimiento es la correspondiente al curado, al evaluar esta fase se hizo notorio que los valores de resistencia encontrados varían drásticamente con el uso de un procedimiento u otro.

Según lo observado en la fase experimental de la investigación y lo socializado en los capítulos 6 y 7, todo cambio en los procedimientos tiene una implicación que puede ser notorio durante la fase de mezclas provocando en ciertas ocasiones que las mezclas en curso no salgan adelante o que la maleabilidad sea muy baja.

La implementación de un tratamiento térmico a la ceniza volante genero un plus valioso en la resistencia a la compresión obtenida y teniendo en cuenta que el tiempo en el horno es de 2 horas no es un proceso que genere sobrecostos.

La adición de fibras de cáñamo en matrices geopoliméricas tiene una viabilidad bastante alta en función de los beneficios generados, puesto que además de mejorar la resistencia a la tracción mejoró la resistencia a la compresión de la probeta.

Para el caso particular de la resistencia a la compresión, esta aumenta con la adición de las fibras de cáñamo industrial. Se asume que esto ocurre debido a que la disposición de una parte de las fibras de cáñamo es perpendicular a la dirección en que se aplica la carga a la probeta, por lo que, al comenzar a deformarse radialmente, las fibras aportan la resistencia a la tensión y aumenta el tiempo y la carga necesarios para fallar la probeta.

La resistencia a la compresión fue optimizada mediante los dos métodos estudiados sin embargo los mejores resultados fueron obtenidos con el tratamiento térmico de la ceniza volante.

La optimización mediante la adición de fibras de cáñamo industrial tuvo mejores resultados para las mezclas de mortero que para las mezclas de pastas este fenómeno puede ser provocado por el aumento de la fricción interna de la matriz debido a la arena presente en esta.

Los resultados obtenidos a partir de la optimización de las matrices con el uso de la fibra de cáñamo industrial generan un precedente para sustentar la viabilidad del uso de los cultivos de cannabis con fines industriales.

## **RECOMENDACIONES**

Los resultados de la presente investigación están sujetos a cambios producto de investigaciones posteriores, por lo cual se recomienda no dar por hecho que es la única posibilidad en cuanto a procedimiento para obtener un geopolímero.

Se recomienda realizar ensayos de caracterización química para comprobar bajo qué criterios se puede realizar el diseño de la mezcla y si los materiales a usar cumplen con los requisitos mínimos.

Se recomienda a quienes tomen los resultados suministrados en el presente informe para llevar a cabo nuevas investigaciones o para replicar los resultados que hagan uso de materiales normalizados.

Se recomienda seguir la línea de investigación ya que de escalar a nivel industrial este material reducirá costos en las obras civiles además que aminorará la carga de CO<sub>2</sub> emitida al medio ambiente por la reducción en la producción de cemento portland tradicional.

## BIBLIOGRAFIA

AL BAKRI, A. M. M., KAMARUDIN, H., BNHUSSAIN, M., NIZAR, I. K., RAFIZA, A. R., & ZARINA, Y. The processing, characterization, and properties of fly ash based geopolymer concrete. 2012 Rev. Adv. Mater. Sci, 30, 90–97.

CHEN-TAN, N. W. Geopolymer from a Western Australian fly ash. PhD thesis Curtin University 2010.

CRIADO, M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: “Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description” Elsevier; Fuel 89 (2010).

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, CURTIN UNIVERSITY, Perth, Australia “Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites” Construction and Building Materials 43 (2013) 37–49.

DUXSON, P., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PROVIS, J. L., LUKEY, G. C., PALOMO, A., & VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: the current state of the art. 2007 Journal of Materials Science, 42(9), 2917–2933.

FERNÁNDEZ-CARRASCO, L.; TORRÉNS-MARTÍN, D. y MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S. *Carbonation of ternary building cementing materials. En: Cement Concrete Comp. ScienceDirect. Article in press.* 2012. p. 6.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.016>.

GARCES, Andrés. Cáñamo: oportunidades de negocios que rompen con paradigmas del pasado. UNIANDÉS agronegocios e industria de alimentos [en línea], 7 de septiembre de 2016 [revisado 12 Enero 2018] Disponible en internet: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/09/07/canamo-oportunidades-de-negocios-que-rompen-con-paradigmas-del-pasado/>



Geopolymerization and Its Potential Application in Mine Tailings Consolidation: A Review citado por: VILLAMOR L., Álvaro. "Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz"

HARDJITO, D., & RANGAN, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. PhD thesis Curtin University of Technology, Australia.

Incorporating ground granulated blast furnace slag" Construction and Building Materials 146 (2017) 615–620

K. KOMNITSAS Y ZAHARAKI D. (2007). "Geopolymerization: A Review and Prospects for the Minerals Industry". Minerals Engineering. 20, 1261-1277.

KOVALCHUK, G., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: "Alkali-activated fly ash: Relationship between mechanical strength gains and initial ash chemistry" Materiales de construcción, 2008. Vol. 58, 291, 35-52.

KOVALCHUK, G., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A.: "Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development-Part II" Fuel, 86, pp. 315-322 (2007).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>

LIBO, Yan; BOHUMIL, Kasal y LIAN, Huang: "A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering" Elsevier; Composites Part B 92 (2016).  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.

M. H. Freeman. Manual de prevención de la contaminación industrial. Editorial McGRAW-HILL, ISBN 970-10-1889-3, 1998, 400-460.

MEJÍA J. M.; RODRÍGUEZ, E. D. y MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de

geopolimeros. Ingeniería y Universidad. 2014, vol. 18, no. 2, pp. 309-327.  
<http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.upcv>

MOLANO, Marfa; TORRES, Nancy: Practicas de laboratorio de materiales para obras de ingeniería civil; Escuela colombiana de ingeniería, 2017.

OSORIO J.A.; ARISTIZABAL F. V. y HERRERA J. A. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. DYNA. 2007, vol. 74, N° 153

PROVIS, John L.; State of the At Report, RILEM TC 224 – AAM, Alkali – Activated Materials

PUERTAS, F. Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico, F. Materiales de construcción. Vol. 43. N.º 229, enero/febrero/marzo 1993 p. 2

PUERTAS, F., MARTINEZ-RAMÍREZ, S., ALONSO, S., & Vázquez, T. (2000). Alkali-activated fly ash/slag cements. Cement and Concrete Research, 30(10), 1625–1632. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00298-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00298-2)

RODRÍGUEZ, M.; ERICH, D. (2009) “Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante”. Universidad Politécnica de Valencia.

SAHA, S.; RAJASEKARAN, C. “Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag” Construction and Building Materials 146 (2017) 615–620.

SHI, C. KRIVENCO, P., DELLA, R. Alkali-activated cements and concretes. Taylor & francis. New york 2006.